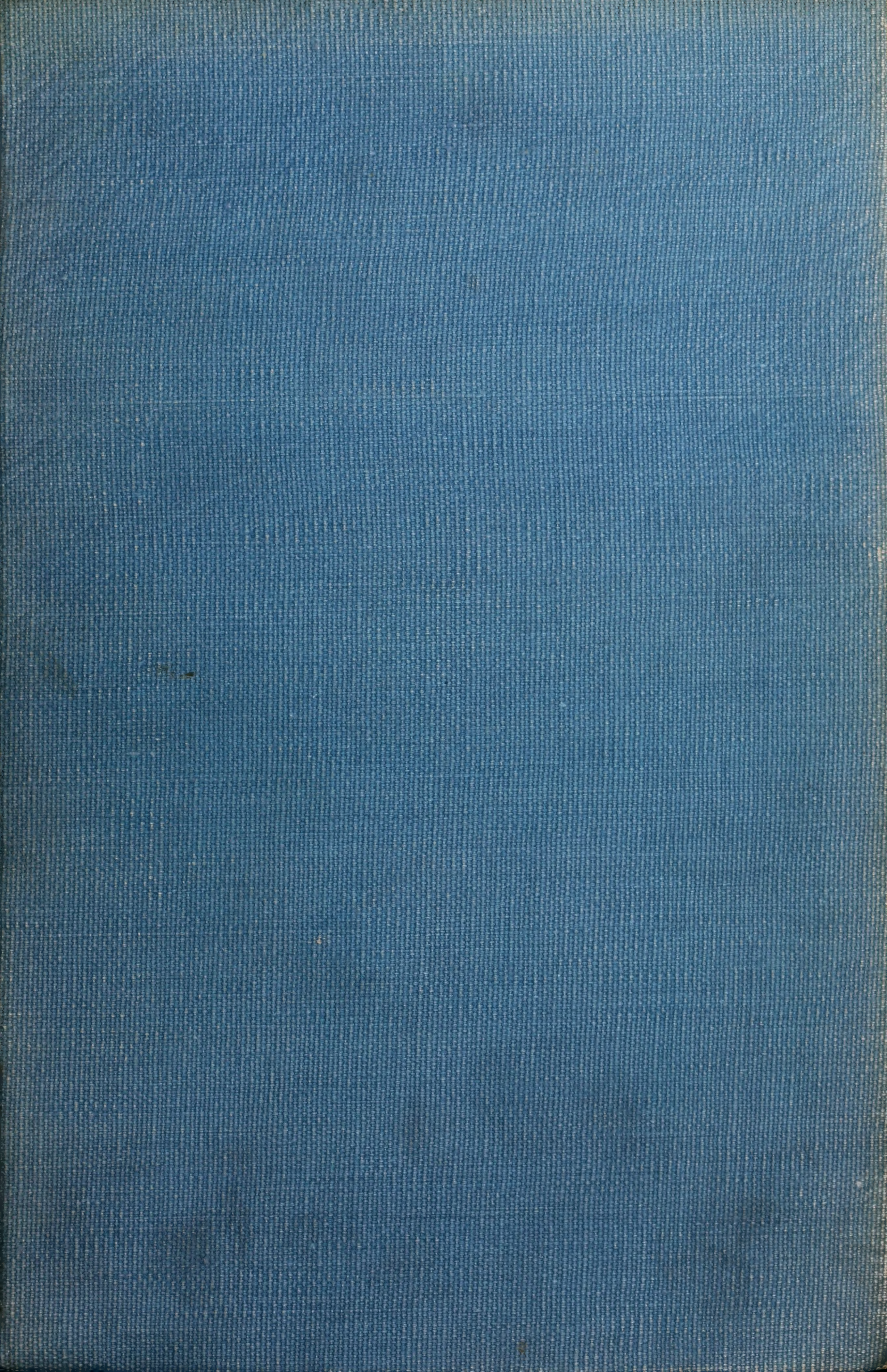



MBL/WHOI
0 0301 0004168 7

Handwörterbuch
der Naturwissenschaften.

Sechster Band.



Handwörterbuch
der
Naturwissenschaften

Herausgegeben von

Prof. Dr. E. Korschelt-Marburg (Zoologie)
Prof. Dr. G. Linck-Jena (Mineralogie und Geologie)
Prof. Dr. F. Oltmanns-Freiburg (Botanik)
Prof. Dr. K. Schaum-Leipzig (Chemie)
Prof. Dr. H. Th. Simon-Göttingen (Physik)
Prof. Dr. M. Verworn-Bonn (Physiologie)
Dr. E. Teichmann-Frankfurt a. M. (Hauptredaktion)

Sechster Band

Lacaze-Duthiers — Myriapoda

Mit 1048 Abbildungen



JENA
Verlag von Gustav Fischer
1912

Inhaltsübersicht.

(Nur die selbständigen Aufsätze sind hier aufgeführt. Eine Reihe von Verweisungen findet sich innerhalb des Textes und ein später herauszugebendes Sachregister wird nähere Auskunft geben.)

L.

M.

L.

Lacaze-Duthiers
Henry de.

Geboren am 15. Mai 1821 auf Schloß Stiguedome bei Montpezat; gestorben am 21. Juli 1901 in Las-Fons in der Dordogne; entstammte einer alten Gascogner Familie. Er studierte in Paris Medizin, wurde dann aber durch die Berührung mit Blainville und besonders Milne-Edwards der Naturwissenschaft zugeführt, ohne der Medizin zunächst untreu zu werden. Bald aber wandte er sich ganz der Naturwissenschaft zu und wurde 1854 Professor der Zoologie und Botanik in Lille. 1863 wurde er nach Paris an das naturhistorische Museum berufen und erhielt 1869 eine Professur an der Sorbonne, die er bis an sein Lebensende inne hatte.

Lacaze-Duthier war Begründer der experimentellen Zoologie in Frankreich; auf seine eigenen Kosten rief er 1872 die bekannte Zeitschrift Archives de Zoologie expérimentale ins Leben. Um die Erforschung der Meeresfauna zu fördern, gründete er 1872 die Zoologische Station in Roscoff an der Küste der Bretagne und das Laboratoire Arayo in Banyuls-sur-Mer und erwarb sich damit nicht nur für Frankreich ein großes Verdienst. Seine wissenschaftlichen Arbeiten förderten die verschiedensten Gebiete der Zoologie; zunächst wandte er sich 1849 bis 1853 dem Studium der äußeren Geschlechtswerkzeuge der Insekten zu. Dann aber führten ihn seine Untersuchungen auf ein anderes Gebiet, das der niederen Seetiere, auf dem er eine Reihe von grundlegenden Arbeiten über die Anatomie und Entwickelungsgeschichte lieferte. So bearbeitete er das Nervensystem der Mollusken, das Gehörorgan der Gastropoden, das Bojanussche Organ, den Hermaphroditismus der Muscheln, die Entwickelung ihrer Kiemen und lieferte außerdem eine Reihe von monographischen Arbeiten. Grundlegend waren seine Untersuchungen über Dentalium, auch förderte er die Kenntnis der Aktinien und Korallen. Als besonderes Verdienst muß es ihm angerechnet werden, daß er zuerst in ausgedehntem Maße die verfeinerte Experimentalphysiologie auf die niedere Tierwelt anwandte. Von seinen Werken sind ferner zu erwähnen Mémoire sur le pourpre (1859), in dem er die Purpurfarben der Alten vom naturwissenschaftlichen Standpunkte aus behandelte. Ferner schrieb er Histoire de l'organisation et du développement du dentale (1858); Histoire naturelle du coraille (1864); Les ascidies simples des côtes de France (1874 bis 1877) und endlich Le monde de la mer et ses laboratoires (1889).

Literatur. *Nekrolog im Arch. d. Zool. expérim. Bd. X 1902.*

W. Harms.

Lagerungsform der Gesteine.

1. Lagerungsformen der Eruptivgesteine: a) Endogene Eruptivkörper: α) Gänge. β) Stöcke. γ) Lakkolithen. δ) Intrusivlager. b) Exogene Eruptivkörper: α) Quellkuppen. β) Ströme. γ) Decken. 2. Lagerungsformen der Sedimentgesteine: a) Geschichtete Absätze. b) Ungeschichtete Absätze. c) Deszensionsgänge.

Die Art und Weise, in der sich Gesteine am Aufbau der Erdrinde beteiligen, hängt so eng mit ihrer Entstehungsweise zusammen, daß sie, neben anderen Kennzeichen, ein wichtiges Merkmal für die Bildungsbedingungen verschiedener Gesteine darstellt.

1. Lagerungsformen der Eruptivgesteine. Das emporsteigende Magma gelangt entweder nicht bis zur Erdoberfläche, sondern bleibt in der Erdrinde selbst stecken und erstarrt zu endogenen oder subterranen Eruptivgesteinskörpern, oder es erreicht die Erdoberfläche und ergießt sich hier als exogene oder superfizielle Eruptivmassen.

1a) Endogene Eruptivkörper setzen bald mit durchgreifender Lagerung quer durch andere Gesteine hindurch, wie es Gänge und Stöcke tun, bald zwängen sie sich, wie Lakkolithen und Lagergänge mit intrusiver Lagerung zwischen die Schichten von Sedimenten und kristallinen Schiefern.

α) Gänge (englisch veins, dykes; französisch filons) sind von Magma ausgefüllte Spalten. Sie bilden plattenförmige Gesteinskörper, welche bald einzeln, bald zahlreich auftreten und dann in einem Bezirke übereinstimmende Streichrichtung zeigen oder einander durchsetzen und damit

ihr gegenseitiges Altersverhältnis bekunden (Fig. 1) oder seltener radial von einem Punkte ausstrahlen (besonders in Vulkandistrikten). Wie die Längserstreckung schwankt auch die Mächtigkeit in weiten Grenzen, da sich Gänge

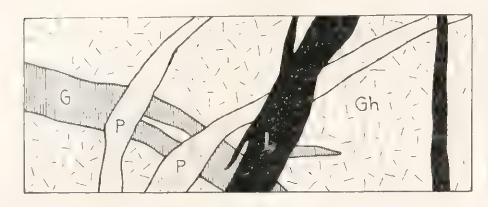


Fig. 1. Verschiedenalterige Eruptivgänge im Hornblendegranitit (Gh) von Meißen in Sachsen: heller Granitit (G), Granophyr (P) und Lamprophyr (L). Nach Sauer.

örtlich verdicken oder verengen, ganz auskeilen und wieder auftun, in mehrere Arme (Trümer) zerschlagen, diese sich wieder scharen können. Gänge stehen oft mit anderen Lagerungsformen in Verbindung, so mit Stöcken und Lakkolithen als deren Ausläufer (Apophysen) oder mit Decken als deren Zufuhrwege. Sowohl Tiefen- als Ergußgesteine treten in Gangform auf, fast ausschließlich in ihr die sogenannten Ganggesteine (Granitporphyre, Aplite und Pegmatite, Lamprophyre). Selten werden verschiedene Gesteine in derselben Gangspalte gefunden; bei diesen gemischten Gängen handelt es sich entweder um Spaltungsvorgänge innerhalb des Magmas und die verschiedenen Spaltungsprodukte liegen dann durch Übergänge verbunden symmetrisch verteilt im Gange, oder eine bereits von Eruptivgesteinen eingenommene Spalte wird von neuem aufgerissen und wieder mit Magma erfüllt. Bei jeder Art von Gesteinen machen sich innerhalb des Ganges meist Gegensätze zwischen Mitte und Rändern (Salbändern) bemerkbar, insofern die Randpartieen feiner körnig bis dicht, glasreicher bis rein glasig, einsprenglingsärmer, parallel struiert, auch wohl dunkler oder heller ausfallen. Außer säuliger, auf den Salbändern senkrecht stehender kommt auch plattige Absonderung parallel den Spalträndern sowie regellose Zerklüftung vor. Topographisch verraten sich Gänge oft gar nicht, bei größerer Widerstandsfähigkeit als das Nebengestein mitunter als Mauern oder lange, schmale Rücken, bei geringerer als Gräben.

β) Stöcke (englisch stocks, necks, cores; französisch vosses, typhons) sind größere Gesteinsmassen von unregelmäßigem bis rundlichem Querschnitt und durchgreifender Lagerung; Nebengesteinsschichten stoßen also an ihnen ab (Unterschied von Lakkolithen). Aussendung von Apophysen in die Umgebung und Ausbildung abweichender Randfazies ist verbreitet. Dabei zeigt die Randpartie entweder andere Struktur als die Gangmitte, ist z.B. feinkörnig (selten sehr grobkörnig als sogenannter Stockscheider) oder porphyrartig ausgebildet, ärmer oder reicher an dunklen Gemengteilen (helle oder dunkle Randfazies) oder mit teilweise oder ganz neuem Mineralbestande versehen, wodurch andere Gesteine entstehen (gemischte Stöcke); dann liegt fast immer das basischere Gestein außen. Als Gangstöcke bezeichnet man verhältnismäßig langgezogene kleinere Stöcke (oder kurze, sehr dicke Gänge). Ethmolith nannte Salomon eine stockartige Lagerungsform (Fig. 2) mit trichterförmiger Verjüngung nach unten, welcher auch die Nebengesteinsschichten

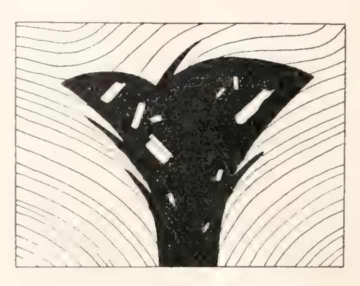


Fig. 2. Ethmolith (Adamellostock) mit Apophysen und Bruchstücken des Nebengesteins. Nach Salomon.

folgen. Die von Iddings unterschiedenen Bysmalithen stoßen ungefähr vertikal durch andere Gesteine hindurch, von welchen sie (im Gegensatz zu eigentlichen Stöcken) durch gleichzeitig entstandene Verwerfungsklüfte getrennt werden. Während bei den genannten Formen das Hauptgewicht auf der durchgreifenden Lagerung (zum Unterschiede von Intrusivkörpern) liegt, betonte E. Sueß bei der Charakteristik der Batholithen das Fehlen einer unteren Begrenzungsfläche; es sind mächtige Eruptivmassen, welche durch Aufschmelzen des Nebengesteins an ihren Ort gelangten und breit in die „ewige Teufe“ niedergehen, nicht wie Lakkolithen seitliche Injektionen über fremder Unterlage darstellen. In Form von Stöcken und verwandten Gebilden kommen namentlich Tiefengesteine vor; auch mächtige Stielmassen von Ergußgesteinen bezeichnet man als Stöcke.

Vulkanische Schlote und Stiele sind röhrenförmige Ausfuhrwege für vulkanisches Material nach der Erdoberfläche, und zwar teils örtlich stielartige Erweiterungen sonst geschlossener Spalten (Stielgänge), teils schußartig durch die explosive Gewalt von Gasen entstandene Durchbohrungen (Diatremen), wie solche Daubrée künstlich nachahmte. Sie sind entweder durch kompakte Eruptiv-

gesteinsmassen vom Charakter der Ergußgesteine erfüllt und bilden Zufuhrwege für vulkanische Decken (Fig. 8) oder Quellkuppen oder Vulkanbaue, oder sie enthalten zerspratztes Eruptivmaterial (Schlacken und Aschen), untermischt mit Brocken der durchschlagenen Gesteinsschichten (Tuffröhren z. B. der Gegend von Urach) und enden dann an der Erdoberfläche gern in Maaren oder maarähnlichen Bildungen.

γ) Lakkolithen nannte Gilbert große, brotlaib- bis glockenförmige Intrusivmassen über ungefähr horizontaler Unterlage, an deren Dach und Flanken sich die aufgewölbten Schichten des Nebengesteins allseitig konkordant anlegen (Fig. 3). Dieses wichtige Unterscheidungsmerkmal den

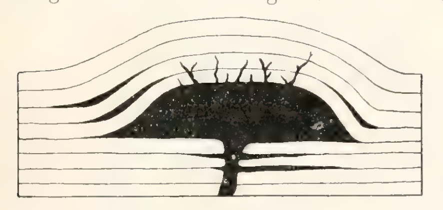


Fig. 3. Einfacher Lakkolith mit Apophysen und Intrusivlagern. Nach Gilbert.

Stöcken gegenüber läßt sich u. a. an dem Denudationsanschnitt durch das Streichen der umgebenden Schichten feststellen, welches bei Lakkolithen ringsum parallel der Grenzen des Anschnitts verläuft, bei Stöcken wechselnde Winkel mit ihr bildet (Fig. 4). Die

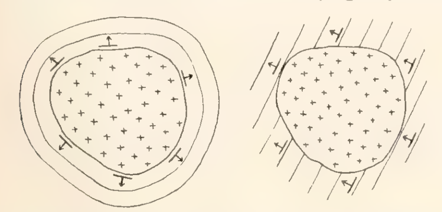


Fig. 4. Streichen und Fallen der Nebengesteinsschichten um den Anschnitt eines Lakkolithen (a) und eines Stockes (b).

Gestalt der Lakkolithen zeigt große Mannigfaltigkeit. Außer einfachen Formen ohne oder mit Apophysen und Intrusivlagern (Fig. 3)



Fig. 5. Lakkolith mit zahlreichen seitlichen Intrusionen. Colorado. Nach Holmes.

gibt es reich gegliederte Körper mit vielen seitlichen, z. T. recht langen Intrusionen (Fig. 5); oder der Lakkolith ist nur zur Hälfte ausgebildet, auf der anderen Seite durch eine gleichzeitig mit der Intrusion entstandene Verwerfung oder Flexur begrenzt (Hemilakkolith Fig. 6); oder er hat im Ver-

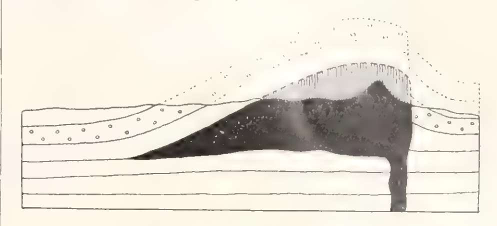


Fig. 6. Hemilakkolith. Nach Stark.

hältnis zur Breite bedeutende Länge, gleicht also einem kurzen, dicken Gange, welcher die anliegenden Sedimente emporgewölbt hat, setzt sich wohl auch an beiden Enden als Vertikalgang fort (Ganglakkolith); oder die Eruptivmasse durchbrach in breiter Oeffnung (nicht als Gang) die aufgewölbte Sedimentdecke und ergoß sich noch auf die Erdoberfläche (Eruptionslakkolith Fig. 7). Stark wies die drei letztgenannten Typen u. a. in den Euganeen nach. Hier wie im böhmischen Mittelgebirge, am

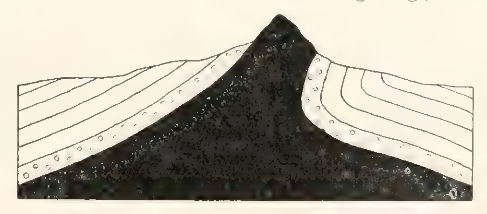


Fig. 7. Eruptionslakkolith. Nach V. d. Derwies.

Nordfuße des Kaukasus, in Colorado treten Gesteine vom Charakter der Ergußgesteine (Trachyte, Phonolithe und Verwandte) in Lakkolithenform auf, während sonst namentlich Tiefengesteine diese Lagerungsform zeigen. Innerhalb der Lakkolithen machen sich in der Gesteinsausbildung dieselben Unterschiede zwischen Rand und Mitte bemerkbar wie in Stöcken und führen bisweilen zur Bildung gemischter Lakkolithen. Eine mehr oder weniger dickbankige Absonderung parallel den Grenzflächen ist verbreitet.

δ) Intrusivlager oder Lagergänge (englisch intrusive sheets oder sills nach dem Whin Sill in Nordengland genannt) entstehen durch Eindringen des Magmas zwischen Gesteinsschichten und bilden plattenförmige Massen. Sie kreuzen auch gelegentlich Schichten in Form von Quergängen und setzen sich dann in einem anderen meist höheren Horizonte als Lagergänge fort. Alle Arten

von Eruptivgesteinen können Intrusivlager bilden. Abweichende Ausbildung des Gesteins an den Grenzflächen und säulige oder plattige Absonderung kommt wie bei Gängen vor. Intrusivlager sind nicht mit Eruptivdecken zu verwechseln, welche nach ihrem Erguß von Sedimenten überlagert wurden (s. unten).

1 b) Exogene Eruptivkörper entstehen durch vulkanische Ergüsse auf der Erdoberfläche oder dem Meeresgrunde und erscheinen als Quellkuppen oder Ströme oder Decken.

α) Quellkuppen oder Primärkuppen (englisch domes) bilden sich durch Aufstauen zähflüssigen Magmas über dem Ausbruchsorte zu kegel- oder glocken- oder schildförmigen Massen. Das Wachstum erfolgt seltener durch wiederholtes Ueberfließen der Lava über die Flanken, so daß die äußeren Teile der Kuppe die jüngsten sind, als meist durch Einpressen neuer Lava in die inneren, unteren Partieen; diese sind dann die jüngsten Bildungen. Die äußere Hülle wird dabei zersprengt und bildet ein Blockwerk (z. B. Mai-Inseln von Santorin 1866), welches später durch Erosion rasch verschwindet. Zurücksinken („Nachsacken") des Magmas im Zufuhrkanale nach beendeter Eruption bewirkt mitunter die Bildung kraterähnlicher Einbrüche der Gipfelpartie. Manche Kuppen mögen aus ihrem Aschenmantel herausgeschälte Lavakerne von Vulkanbauen sein. Alle Ergußgesteine treten gelegentlich in Quellkuppen auf. Von sekundären, durch Erosion aus Decken oder Gängen oder anderen Eruptivkörpern herausgearbeiteten kuppenförmigen Gebilden unterscheidet sie die Säulen- oder Plattenstellung.

β) Ströme (englisch streams, französisch coulées) sind Oberflächenergüsse von großer Länge im Verhältnis zur Breite. Sie liegen auf geneigter Unterlage, folgen mitunter Tälern, stauen sich an Hindernissen, umfließen sie und teilen sich in Arme, die sich wieder vereinigen können. Die rasch erkaltenden Außenpartieen bilden gewöhnlich einen Schlackensack, in welchem die Lava weiterfließt, beständig die Stirnseite vor sich her zu Boden drückend. In den von der Lava verlassenen Teilen der Schlackenröhre bricht gelegentlich die Decke ein, und es entstehen eigentümliche Höhlungen, Lavakeller, oder Gräben. Die Oberflächenpartieen von Strömen sind glasreich bis rein glasig und zeigen oft schlackige, tauähnliche, fladen- oder wulstförmige Bildungen, während das Strominnere kompaktes Gestein enthält. Fluidale Struktur und säulige Absonderung sind verbreitet.

γ) Vulkanische Decken (englisch sheets) unterscheiden sich von Strömen wesentlich dadurch, daß sie nicht lineare, sondern Flächenausdehnung besitzen. Der Gegensatz zwischen Außen- und Innenpartie, charakteristische Oberflächenbeschaffenheit und häufige Säulenbildung besteht auch hier. Decken liegen bisweilen, durch Tuffschichten getrennt, in großer Zahl übereinander; die Deckenränder zeigen dann Steilabfälle, die Tufflagen flache Böschungen (Fig. 8). Wenn Decken, besonders am Meeresgrunde ergossen, von Sedi-

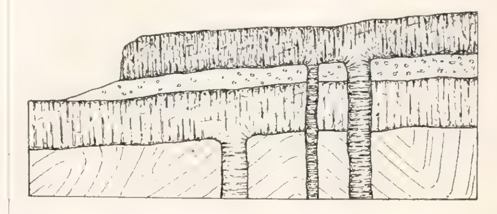


Fig. 8. Durch Tuff getrennte vulkanische Decken mit Zufuhrkanälen.

menten überlagert werden, erinnern sie später im Anschnitt an Intrusivlager. Sie können aber keine Verästelungen in das Hangende entsandt, keine Kontaktwirkungen in ihm hervorgebracht und keine Einschlüsse aus ihm aufgenommen haben; Intrusivlagern dagegen fehlt die Begleitung durch Tuffe und die schlackige Ausbildung der Ober- und Unterfläche.

2. Lagerungsformen der Sedimentgesteine. Die verbreitetste Lagerungsform der Sedimentsgesteine sind geschichtete Massen, denen gegenüber ungeschichtete weit zurücktreten, noch seltener durchsetzen Sedimente in Form von Gängen oder Tuffröhren andere Gesteine.

2 a) Geschichtete Absätze sind aufgebaut aus annähernd parallelflächig begrenzten tafelförmigen Gesteinsmassen, welche durch Absatz verschiedenartigen Materials aus Wasser oder Luft entstehen. Die obere und untere Fläche (Dach und Sohle) sind bald glatt, bald mit mancherlei Skulpturen, wie Wind- und Wellenfurchen (Rippelmarken), Trockenrissen, Netzleisten, Steinsalzpseudomorphosen, Tierfährten u. dgl. versehen. Aufeinanderfolgende Schichten unterscheiden sich voneinander durch abweichende Korngröße oder anderen Mineralbestand, der oft verschiedene Färbung bedingt; doch ist bisweilen eine Schicht so dünn, daß sie nur als Besteg zwischen zwei anderen, vielleicht gleichartigen auftritt und eine Schichtfuge hervorruft. Nach den Rändern hin verdünnen sich die Schichten; sie keilen sich aus. Die Mehrzahl der Schichten ist ursprünglich horizontal (schwebend) oder nahezu horizontal abgelagert worden. Ursprünglich geneigte Lagerung findet sich z. B. bei Aschen- und Tuffschichten auf geneigter Unterlage und in Aschenkegeln über Ausbruchsstellen, wo sie nach außen flacher, nach innen steiler

einfallen, bei manchen Quellabsätzen und als sogenannte Kreuzschichtung (Diagonalschichtung, diskordante Parallelstruktur). Sie entsteht dadurch, daß Transportmittel von wechselnder Intensität und Richtung bereits gebildete Ablagerungen von oben oder von der Seite her teilweise zerstören und dann Schichten von abweichender Neigung absetzen (Fig. 9). Besonders Dünen-



Fig. 9. Kreuzschichtung in diluvialem Flußschotter.

und Deltabildungen sowie Absätze schweifender Gewässer (Gletscherbäche) zeigen Kreuzschichtung.

2 b) Ungeschichtete Absätze bilden Sedimente da, wo nur gleichartiges Material zum Absatz kommt, wie z. B. bei Löß- und manchen Lehm- oder Tonmassen, ferner da, wo bei dem Absatz keine Sonderung durch Wasser oder Luft erfolgt, wie bei manchen Gletscherbildungen (Grundmoränen), bei Riffbauten von Korallen, Bryozoen, Spongien, bei Breccien und vielen Konglomeraten.

2 c) Deszensionsgänge oder klastische Gänge sind selten und entstehen dadurch, daß klaffende Spalten durch eingeschwemmten Sand, Ton, Kalkdetrius u. dgl. ausgefüllt werden. Von Eruptivgängen sind sie durch die Art des Gesteins zu unterscheiden.

Literatur. ***R. A. Daly,*** *Amer. journ. of Geol. 13, 1905, 485 bis 508 (Intrusivkörper).* – ***W. Salomon,*** *Sitzungsber. Berliner Akad. 14, 1903 (Ethmolith)* — ***E. Suess,*** *Antlitz der Erde I 1892, 219, III 2. Hälfte, 1909, 633 (Batholith).* — ***A. Daubrée,*** *Bull. Soc. Géol. France 19, 1891, 313 u. 944 (Diatremen).* — ***W. Branca,*** *Schwabens 125 Vulkanembryonen, Stuttgart 1895 (Tuffröhren).* — ***G. K. Gilbert,*** *U. S. Geogr. a. Geol. Survey of the Rocky Mountain Region, Washington 1877 (Lakkolithen).* — ***M. Stark,*** *Festschr. naturwiss. Verein a. d. Univers. Wien 1907 (Lakkolithen).*

R. Reinisch.

Lagrange

Joseph Louis.

Geboren am 25. Januar 1736 in Turin; gestorben am 10. April 1813 in Paris. Er war der Sohn sehr reicher Franzosen, die ihr Vermögen verloren, studierte Philosophie und Mathematik, wurde mit 19 Jahren Professor der Mathematik an der Artillerieschule in Turin, 1759 von Friedrich dem Großen als Mitglied der Akademie nach Berlin berufen, 1760 Direktor daselbst. 1787 kehrte er nach Paris zurück, wo Marie Antoinette ihm eine Wohnung im Louvre zur Verfügung stellte; er wurde dort Akademiker und Mitglied der Belohnungskommission für nützliche Erfindungen und 1792 Vorsteher der Münze. Nach der Revolution wurde Lagrange zum Professor an der neuerrichteten Normalschule und der polytechnischen Schule in Paris und zum I. Mitglied des Instituts für Längengrade ernannt. Napoleon I. ernannte ihn zum Mitglied des Senats und erhob ihn in den Grafenstand. Seine Leiche ist im Pantheon beigesetzt. Lagrange begründete die Störungstheorie der Himmelskörper, arbeitete auf dem Gebiet der Zahlentheorie, Reihentheorie, Theorie der algebraischen Gleichungen. Sein Versuch, die höhere Analysis streng zu begründen, war von großem Einfluß auf deren weitere Entwickelung. 1789 widersetzte er sich der Einführung des Zwölfersystems der Zahlen, weil er die gemeinen Brüche durch Dezimalbrüche ersetzt wissen wollte.

Literatur. ***R. Wolf,*** *Handbuch der Astronomie, Bd. II, Zürich 1890.* — ***Derselbe,*** *Geschichte der Astronomie, München 1877.* — ***Rosenberger,*** *Geschichte der Physik III S. 88, 89, Braunschweig 1887 bis 1899.*

E. Drude.

Lamarck

Jean Baptiste Pierre Antoine Monet de.

Geboren am 1. August 1744 zu Barenteine in der Picardie; gestorben am 18. Dezember 1829 in Paris. Er war zuerst Offizier, widmete sich dann dem Studium der Medizin und Naturwissenschaften. Er wurde 1779 Mitglied der Pariser Akademie und hatte von 1793 an die Professur für Wirbellose am Jardin des plantes inne. Bevor er diese Professur übernahm, hatte sich Lamarck vorwiegend mit Botanik beschäftigt; als Frucht dieser Studien gab er 1778 seine dreibändige Flore française heraus, die jedoch infolge der bei der Pflanzenklassifikation angewandten analytischen Methode wenig Beifall fand. Außer mit Botanik beschäftigte sich Lamarck auch noch mit Physik und Chemie, namentlich mit Meteorologie. Obwohl er Zoologie vor seiner Uebernahme der Professur kaum betrieben hatte, wandte er sich jetzt dieser Wissenschaft mit großer Energie zu. Er hat sich durch sein System der wirbellosen Tiere sowie durch die Bearbeitung der fossilen Weichtierreste als ein besonderer Formenkenner seine rühmliche Stellung erarbeitet. Indem er zuerst die Wirbeltiere den Wirbellosen gegenüberstellte und dann jene systematisch durch gut begründete anatomische Unterlagen weiter gliederte, gab er Veranlassung zur schärferen Hervorhebung des Typischen in der Tierklassifikation. Als größtes Verdienst muß es Lamarck angerechnet werden, daß er mit dem alten Artbegriff brach und die Unver-

änderlichkeit der Arten verneinte. Er sagt wörtlich, daß die fast allgemein angenommene Voraussetzung, die lebenden Körper bilden durch unveränderliche Merkmale beständig verschiedene Arten, welche so alt wie die Natur selbst wären, alle Tage widerlegt wäre. Lamarck verneint aber nicht nur die Unveränderlichkeit der Arten, sondern sucht auch die bei deren Umbildung wirksamen Momente zu erklären. Zu diesen rechnet er in erster Linie die Gewohnheit und die Lebensweise der Tiere, schreibt aber auch den äußeren Einflüssen und der Erblichkeit eine Wirkung zu, namentlich um die eintretenden Veränderungen zu fixieren. Lamarck ist daher als Begründer der Deszendenzlehre aufzufassen. Bei ihm brach sich schon die Ueberzeugung Bahn, daß die Tierwelt auf gemeinsame Urformen zurückgehe; für die niedersten Wesen nimmt er Urzeugung an, aus ihnen sind dann die höheren abzuleiten. Aus den Urorganismen seien durch den Einfluß von Gebrauch und Nichtgebrauch, sowie den der Vererbung erworbener Eigenschaften höhere Organismen entstanden. Den Ablauf dieser Erscheinungen denkt er sich streng mechanisch in der Annahme, das Leben beruhe auf zwei Agentien: Wärme und Elektrizität. Lamarck ist von seiner Zeit verkannt und als Phantast über die Achsel angesehen worden. Seiner Natur nach mild und nachgiebig, hat er nie die letzten Konsequenzen seiner Theorieen gezogen; er hat auch nicht mit der Tradition der mosaischen Schöpfungslehre gebrochen. So lebte er nur in seiner Spezialwissenschaft fort, bis auch seine Ideen mit und nach Darwin zeitgemäß wurden und neuerdings in der Richtung des Neolamarckismus geradezu ein Wiederaufleben erfahren.

Seine wichtigsten Schriften sind Flore francaise (1778 3 Bde); Système des animaux sans vertèbres (1809); sein Hauptwerk Histoire des animaux sans vertèbres (1815 bis 1822 7 Bde); Philosophie zoologique (1809 2 Bde); Recherches sur les causes des principaux faits physiques (1794 2 Bde) und Refutations de la théorie pneumatique (1796).

Literatur. ***Claus***, *Lamarck als Begründer der Deszendenzlehre, Wien 1888.* — ***A. Lang***, *Zur Charakteristik der Forschungswege von Lamarck und Darwin, Jena 1889.* — ***E. Ferrier***, *Lamarck et le transformisme actuel, Paris 1893.* — ***Packard***, *Lamarck the founder of evolution, London 1902.*

W. Harms.

Lambert
Johann Heinrich.

Geboren am 26. August 1728 in Mülhausen i. E.; gestorben am 25. September 1777 in Berlin. Er war der Sohn eines armen Schneiders und seiner Bildung nach vollkommener Autodidakt. Schon als Sechzehnjähriger fand er, damals Buchhalter an den Montbéliard-Eisenwerken, bei der Berechnung der Kometen von 1744 das sogenannte Lambertsche Theorem (vgl. den Artikel „Photometrie“), 1746 ging er als Sekretär zu Iselin in Basel, 1748 als Hauslehrer zum Präsidenten Salis in Chur, 1759 wurde er ordentlicher Professor und Mitglied der Akademie der Wissenschaften in München, 1765 Mitglied der Akademie und des Kollegiums zur Oberaufsicht über die allgemeinen Landesverbesserungen und das Landbauwesen in Berlin. In seiner Schrift Neues Organon oder Gedanken über die Erforschung und Beziehung des Wahren gab er mit Hilfe der Mathematik eine neue Methode der Philosophie. Sein Briefwechsel mit Kant findet sich in dessen vermischten Schriften. Lambert ist als der Begründer der wissenschaftlichen Photometrie anzusehen. Wenngleich Bouguer das erste Photometer konstruiert hatte, so gab Lambert die für die Lichtmessung auch jetzt noch gültigen wissenschaftlichen Grundlagen.

Literatur. ***Huber***, *J. H. Lambert nach seinem Leben und Wirken, Basel 1829. (Mit vollständigem Verzeichnis seiner Schriften.)* — *Festschrift des Pfarrers* ***Joseph***, *Mülhausen i. E. 1828* — ***Marie***, *Histoire des Sciences math. et phys., Paris 1886.* — ***R. Zimmermann***, *Der Vorgänger Kants, Wien 1879.* — ***Rosenberger***, *Geschichte der Physik I S. 323 bis 325, Braunschweig 1882.*

E. Drude.

Lamellibranchiata.

1. Morphologie: a) Die Kalkschale. b) Der Mantel. c) Die Sinnesorgane. d) Die Kiemen. e) Die Mundsegel. f) Die Wimperung. g) Fuß und Byssus. h) Die Muskulatur. i) Das Nervensystem. k) Der Darm. l) Herz und Gefäßsystem. m) Die Niere. n) Die Keimdrüsen. 2. Entwickelung. 3. Systematik. 4. Biologie.

Mit dem Namen Lamellibranchiaten nach den gewöhnlich blattförmigen Kiemen oder Bivalven (Klappmuscheln) oder Pelecypoden (Beilfüßer) oder auch Acephalen bezeichnet man eine Klasse der Mollusken, die sich äußerlich durch eine rechte und eine linke, mittels eines Schloßbandes gelenkig verbundene Schalenhälfte auszeichnet, während der Weichkörper hauptsächlich durch das Fehlen eines Kopfes mit Augen und Fühlern gekennzeichnet ist.

1. Morphologie. 1a) Die Kalkschale besteht in der Regel aus 2 symmetrischen Klappen, selten sind diese auffallend ungleich, indem die eine konvex, die andere konkav ist (Pecten usw), oder indem das Tier entweder mit einer Schalenhälfte (Ostrea, Chama usw) oder durch einen asymmetrischen verkalkten Byssus (Anomia) angewachsen ist. Allerdings sind auch die äußerlich symmetrischen Schalenklappen fast immer dadurch verschieden, daß sie am Rücken in der Nähe des Bandes zahnartige Fortsätze aufweisen, die in Gruben der anderen Schale eingreifen, und dieses sogenannte Schloß mehr oder weniger deutlich auf beiden Seiten ungleich ist. Dieses Schloß, das zur festeren Verbindung beider Hälften dient, ist für die Systematik wichtig; nach seinem Verhalten hat man eine Anzahl von Gruppen benannt, so besitzen die Taxodonten zahlreiche

Zähnchen in gerader oder geknickter Reihe, die Heterodonten wenige Hauptzähnchen, daneben zuweilen noch Seitenzähne. Nicht selten bildet sich freilich das Schloß zurück, so daß in verschiedenen Gruppen der Schloßrand glatt ist. Ganz ausnahmsweise verliert die Schale das Ligament, so daß beide Hälften nur durch Muskeln verbunden sind (*Pholadidae*).

Die *Form der Schale* zeigt große Unterschiede, sie ist bei einigen Arten der Gattung *Arca* breit und niedrig, mit stark vortretenden Wirbeln, bei anderen Arten schmaler und höher, die Rückenfläche wird kleiner und so nähert sich die Form mehr der bei der großen Mehrzahl der Gattungen vorhandenen, die eine ei- bis scheibenförmige, häufig zusammengedrückte, seltener fast kugelrunde Schale besitzen; zuweilen ist sie vorn spitz und nach hinten verbreitert (Fig. 1), zuweilen lang und schmal, von vorn bis hinten gleichbreit. Bei einer Gruppe röhrenbewohnender Arten umhüllen sich die weit aus der Schale herausragenden Siphonen mit einer Kalkröhre, die bald ohne Verbindung mit der Schale bleibt, bald diese, die infolgedessen rudimentär wird, umschließt und in sich aufnimmt (*Aspergillum* Fig. 2).

Die *Schalenränder* schließen meistens fest aneinander, doch bleibt zuweilen ein mehr oder weniger breiter Spalt für den Durchtritt des Byssus, der bei *Anomia* von der einen Schalenhälfte asymmetrisch umwachsen wird, oder für die Siphonen; bei *Pinna* bleibt das breite, nach oben gewendete Hinterende der Schale offen und bei einigen Gattungen (*Galeomma*, *Gastrochaena*) klafft die Schale an der Bauchseite weit auseinander.

Die *Oberfläche der Schale* ist bald glatt, bald mehr oder weniger auffallend skulptiert. Außer den Anwachsstreifen können diesen parallele stärkere Reifen und zu diesen senkrechte Falten oder Rippen, seltener schräge Erhebungen vorkommen. Zuweilen erheben sich kleine Stacheln, selbst lange Dornen oder rinnenförmige Fortsätze von der Oberfläche. Die radiären Falten und Rippen können am Rande ineinandergreifen, aber auch bei äußerlich glatten Schalen kann der innere Rand mit einer Reihe kleiner Zähnchen besetzt sein, wodurch die Festigkeit des Verschlusses vergrößert wird.

Die *Innenseite der Schale* läßt mehr oder weniger deutlich die Ansätze der Muskeln erkennen, am auffallendsten die der Schließmuskeln, deren bei der Mehrzahl 2 vorhanden sind, der eine meist dem Vorderrande, der andere dem Hinterrande genähert (Dimyarier). Bei Mytiliden rückt der hintere Schließmuskel mehr nach der Mitte der Schale hin und gewinnt dadurch an Bedeutung und Umfang, während der vordere infolge seiner Lage in der Spitze schwächer

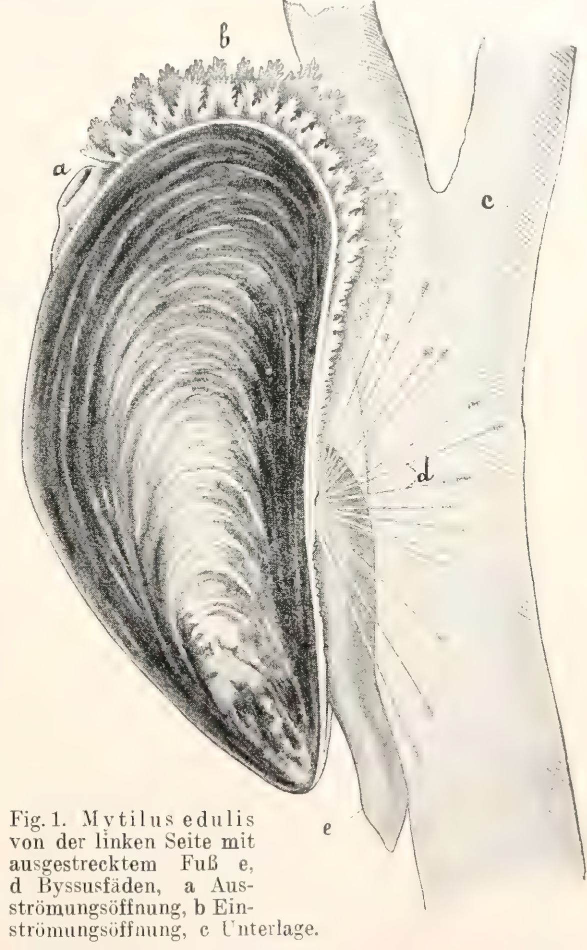


Fig. 1. *Mytilus edulis* von der linken Seite mit ausgestrecktem Fuß e, d Byssusfäden, a Ausströmungsöffnung, b Einströmungsöffnung, c Unterlage.

wird (Heteromyarier) und sich bei einer Reihe von anschließenden Familien ganz rückbildet (Monomyarier Fig. 3). Die Formen mit 2 annähernd gleichgroßen Schließmuskeln werden auch als Isomyarier den Anisomyariern gegenübergestellt, deren vorderer Muskel verkleinert oder ganz verschwunden ist.

In einiger Entfernung vom Schalenrande und diesem im wesentlichen parallel ver-

läuft die Mantellinie, an der die Muskulatur des Mantelrandes sich anheftet. Bei den Gruppen, deren Mantel hinten in

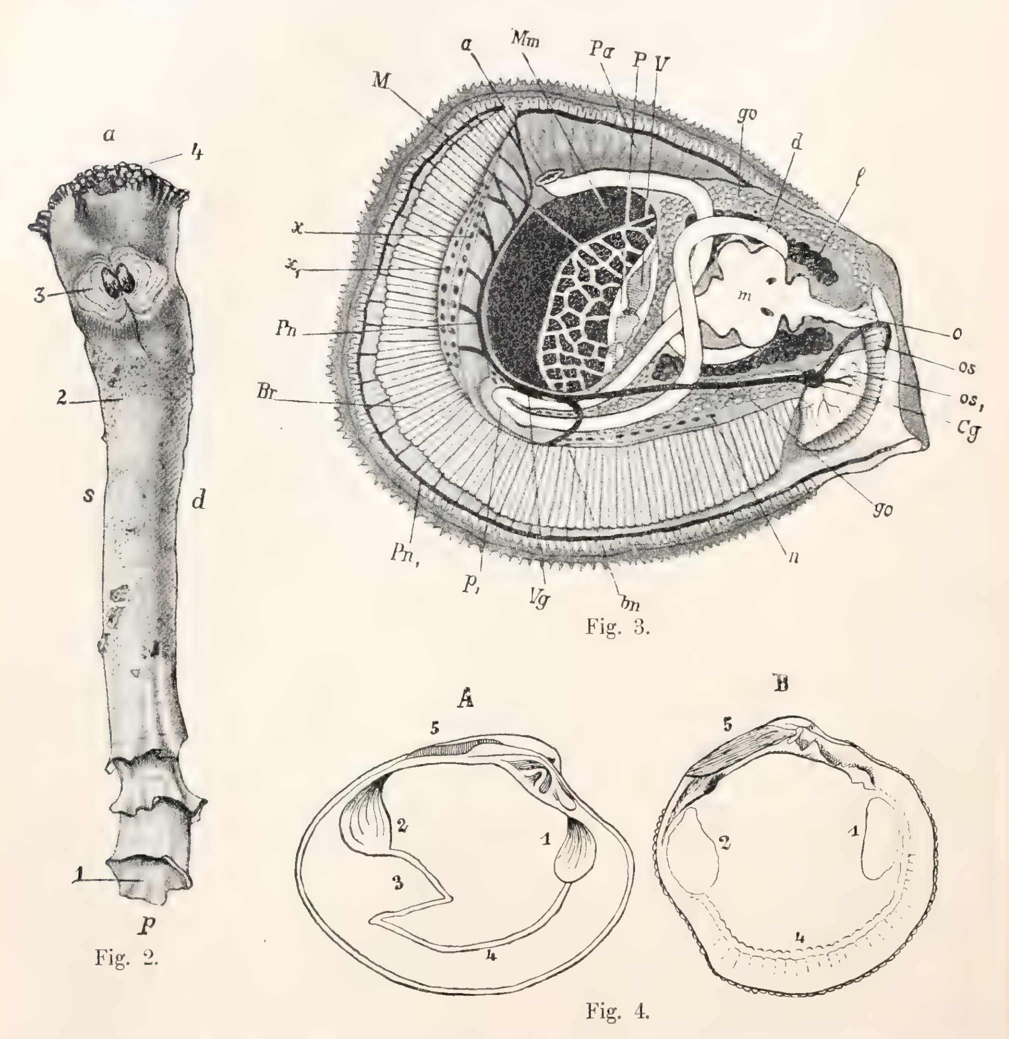


Fig. 2. Schale von Aspergillum vaginiferum. a vorn, p hinten, d rechts, s links, 1 Siphonalöffnung, 2 Kalkröhre, 3 echte Schale, 4 vordere Löcher der Röhre.

Fig. 3. Anatomie der Auster von der rechten Seite. Br Kieme, Pn hinterer Mantelnerv, x x_1 Oeffnungen der Hohlräume zwischen den Platten der beiden linken Kiemenblätter, M Mm Schließmuskel, a After, Pa Mantel, P Herzbeutel, V Herz, gv Keimdrüse, d Darm, l Leber, o Mund, os os_1 Mundlappen, Cg Cerebralganglion, n Niere, bn Kiemennerv, Vg Visceralganglion, P_1 Abdominalfortsatz, Pn_1 Mantelrandnerv, m Magen.

Fig. 4. Innenseite der linken Schalenklappe A von Cytherea chione (sinupalliat), B von Lucina pensylvanica (integripalliat). 1 2 Narben der Schließmuskeln, 3 Mantelbucht, 4 Mantellinie, 5 Schloßband.

Siphonen ausgezogen ist, hat sich für den Ansatz von deren Rückziehern eine Einbuchtung entwickelt (Sinupalliaten Fig. 4A), die unter dem Ansatz des hinteren Schließmuskels sichtbar ist.

Das Schloßband oder Ligament besteht meistens aus einem äußeren und einem inneren Teil; dieser (Knorpel, Resilium) ist als ein schwach verkalkter Teil der Schale aufzufassen, dessen Aufgabe darin besteht, durch seine Elastizität die Schale zu öffnen, sobald die Zusammenziehung der Schließmuskeln aufhört. Das Ligament ist bald ein äußeres, bald ein inneres, das zwischen den Schloßzähnen gelegen ist und zuweilen asymmetrisch wird, indem die eine Schalenhälfte an seinem Ansatz einen Fortsatz

bildet, der sich unter den Ansatz an der anderen Hälfte hinüberschiebt (M y a). Nach der Lagebeziehung des Ligamentes zu den Schalenwirbeln hat man es als amphidet bezeichnet, wenn es zwischen diesen sich auch nach vorn ausdehnt, und als opisthodet, wenn es nur hinter den Wirbeln gelegen ist.

1 b) Der Mantel. Die ganze Innenseite der Schale wird von einer Hautfalte, dem Mantel, bekleidet und von ihm abgesondert. Wie die Schale ist auch der Mantel paarig und nur an seinem oberen Teil mit dem Körper verwachsen. Die beiden Mantelfalten umschließen das ganze Tier, insbesondere den zurückgezogenen Fuß und die Kiemen. Ursprünglich sind die Mantelfalten vorn, unten und hinten getrennt, doch meistens kommt es zu Verwachsungen der beiden Ränder, zuerst bildet sich in der Regel am Hinterende eine Verwachsung, wodurch der obere Teil in der Nähe der Afteröffnung von dem übrigen Mantelspalt getrennt wird; weiter verwächst häufig der hintere und untere Teil der Mantelränder, so daß 2 Oeffnungen am Hinterende von einer vorderen abgetrennt werden, in einigen wenigen Fällen kann sogar noch eine 3. Verwachsung zustande kommen. An den beiden hinteren Oeffnungen zieht sich meistens der Mantel zu mehr oder weniger langen Röhren, den Siphonen, aus, die entweder getrennt oder in verschiedener Ausdehnung miteinander verwachsen sind. Durch die untere tritt das Wasser infolge einer Wimperung der Kiemenoberfläche in den Mantelraum ein und durch die obere wieder aus. Nur ausnahmsweise (bei Kellya usw.) wird das Wasser durch eine vordere Mantelöffnung aufgenommen und durch eine hintere ausgestoßen (Fig. 5). Bei einer kleinen Gruppe von Zweischalern überwächst der Mantel zuerst nur teilweise, dann vollständig die Außenseite der Schale; infolgedessen können das Schloß und die Schalenschließer zur Rückbildung neigen.

Fig. 5. Kellia suborbicularis von unten. a vorn, p hinten, 1 vordere Einströmungsöffnung, 2 verwachsener Mantelrand, 3 mittlere Oeffnung, 4 mittlere Mantelfalte, 5 hintere Ausströmungsöffnung, 6 hinterer Schließmuskel.

Der freie Mantelrand, der hauptsächlich das Wachstum der Schale zustande bringt und das sie überziehende Periostracum erzeugt (vgl. den Artikel „Mollusca"), enthält für diese Aufgabe meistens Drüsen. Da er hauptsächlich mit der Außenwelt in Berührung kommt, bilden sich an ihm häufig Tastorgane oder auch lichtempfindliche Organe aus, die bei den mit Siphonen ausgestatteten Gruppen auf die Enden der Siphonen beschränkt sind. Nur bei Calyculina lacustris ist nachgewiesen, daß die Schale von zahlreichen feinen Kanälchen durchsetzt ist, in denen Fortsätze des Mantelepithels stecken.

1 c) Die Sinnesorgane. Lichtempfindliche Organe von sehr einfachem Bau finden sich am Mantelrande von Arca- und Pectunculus-Arten. Sie bestehen aus einer einfachen Schicht von fächerförmig angeordneten Epithelzellen; jede Sehzelle ist von Pigmentzellen umgeben. Dagegen sind die Augen am Mantelrande von Pecten und Spondylus viel höher entwickelt. Sie stellen Bläschen dar mit einer zelligen Linse und einer Netzhaut, deren Stäbchen wie im Wirbeltierauge vom Licht abgewendet sind; ihnen gegenüber liegt ein Pigmentepithel. Auch in den Tentakeln an den Siphonen von Cardium muticum sind ähnliche Augen vorhanden. Den Kopfaugen der Schnecken entsprechende Augen sind bei den Bivalven rückgebildet, indessen sind bei mehreren Familien am Ende der Mundlappen rudimentäre Augenbecher nachgewiesen worden.

In der Nähe der Pedalganglien findet sich ein Paar Statocysten (gewöhnlich als Otocysten bezeichnet), deren Nerven von den Cerebralganglien ausgehen. Bei Nuculiden hängt jedes dieser Bläschen durch einen Kanal mit der Oberfläche des Fußes zusammen und statt der sonst in ihnen erzeugten Kalkkörper (Otolithen oder Otoconien) werden Sandkörnchen aufgenommen. Bei einigen Arten (Yoldia, Arca) bildet sich der Kanal zurück, so daß er teilweise durch einen Strang angedeutet ist.

Außerdem sind bei Muscheln verschiedene Hautsinnesorgane nachgewiesen, deren Funktionen indessen noch zweifelhaft sind. Die sogenannten Osphradien sind Streifen sensiblen Epithels an oder auf der Kiemenachse; sie werden vom gangliösen Kiemennerv versorgt. Bei den meisten Gattungen ohne Siphonen findet sich jederseits vom After ein Sinneshügel (abdominales Sinnesorgan), der vielleicht zur Regulierung der Wasserströmungen in der Mantelhöhle in Beziehung steht. Bei Siphoniaten sind ähnliche Organe am Grunde des unteren Sipho beobachtet. Bei Nuculiden und Verwandten kommt an der Außenseite des

Mundlappengrundes ein Sinnesorgan (adorales Sinnesorgan) vor.

1 d) Die Kiemen. Die Kiemen der Zweischaler werden neuerdings für deren systematische Einteilung verwertet. Die Mehrzahl hat jederseits 2 Blätter, daher rührt ihre Bezeichnung als Lamellibranchiaten. Bei den ursprünglichsten Gruppen finden wir indessen ähnlich wie bei den primitivsten Schnecken jederseits eine Kieme, die aus einer Achse und 2 Reihen von kurzen Blättchen besteht (Protobranchier Fig. 6 A). Bei anderen verlängern sich die Blättchen zu fadenförmigen Anhängen und in der Regel biegen sich diese nach außen um, so daß jeder Faden aus einem absteigenden und einem aufsteigenden Schenkel besteht. Eine Verbindung der hintereinander stehenden Fäden wird durch Wimperbürsten bewirkt. Während zunächst jeder Faden durch eine Scheidewand geteilt ist und vom Blut hin und zurück in ganzer Länge durchströmt wird, verwachsen bei anderen die Enden der aufsteigenden Schenkel miteinander und bilden ein Längsgefäß. Weiter kann die Längsreihe der Fäden sich falten, wobei die ein- und vorspringenden Kanten beider Blätter einander gegenüberliegen und sich besonders ausbilden (Grenzfilamente); zwischen den inneren Grenzfilamenten kommt es häufig zu Verwachsungen (Fig. 7). Bei anderen Gruppen bleibt die Fadenreihe ungefaltet, aber nicht nur zwischen den Fäden desselben Blattes, sondern auch zwischen den ab- und aufsteigenden Lamellen entstehen mehr oder weniger ausgedehnte Verwachsungen, wodurch die Zusammensetzung aus Fäden undeutlich wird und die Kiemen zu Blättern werden, die von Löchern und Spalten durchsetzt sind. Die Längsgefäße der aufsteigenden Lamellen können außen mit dem Mantel, innen mit dem Fuß und hinter ihm mit dem der Gegenseite verwachsen; dadurch wird die Mantelhöhle in eine untere und eine obere Kammer geteilt und das in jene einströmende Wasser gelangt durch die Kiemenspalten in die obere Kammer und von da durch den oberen Sipho wieder nach außen. Das äußere Kiemenblatt ist zuweilen nicht dem inneren parallel, sondern aufwärts gerichtet und nicht nur seine aufsteigende Lamelle, sondern auch das ganze Blatt kann verloren gehen. Bei einigen Gattungen verschmälern sich die Kiemenblätter und bilden sich zu einer von kleinen Sieben oder Löcherreihen durchsetzten Scheidewand um (Septibranchia Fig. 6 D u. 8).

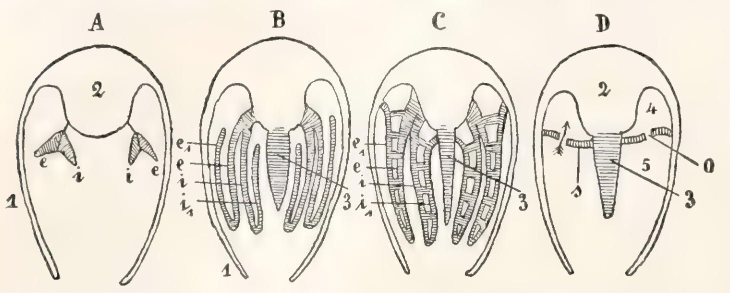


Fig. 6. Schematische Querschnitte. A Protobranchia. B Filibranchia. C Eulamellibranchia. D Septibranchia. 1 Mantel, 2 Eingeweide, 3 Fuß, e e_1 äußeres, i i_1 inneres Kiemenblatt, s Septum zwischen (4) oberem und (5) unterem Mantelraum.

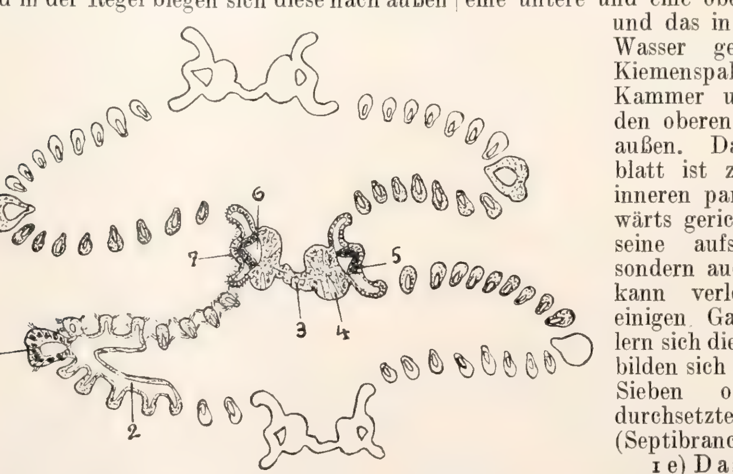


Fig. 7. Teil eines Längsschnittes durch ein Kiemenblatt von Lima. 1 äußeres Grenzfilament, 2 Verbindung zwischen den Fäden, 3 4 Verbindung zwischen den inneren Grenzfilamenten 7, 5 Stützstab, 6 Blutraum.

1 e) Das Mundsegel. An das Vorderende der Kiemen schließt sich in der Regel ein Paar Hautfalten, die Mundsegel, die bei den Familien verschiedene Form und Größe haben, die aber stets an den einander zugewendeten Seiten eine Anzahl querer Leisten aufweisen, während ihr mittlerer Teil vor und hinter der Mundöffnung verläuft und glatt ist. Bei Nuculiden findet sich an den Hinterenden der Mundsegel jederseits ein tasterähnlicher Anhang, der zuweilen aus

der Schale herausgestreckt werden kann und der Nahrungsaufnahme dient.

1 f) Die Wimperung. Die Wimperung der Kiemen verursacht auf ihrer Oberfläche eine Wandströmung, durch die kleine Fremdkörper in Schleim gehüllt nach vorn geführt werden, so daß sie zwischen die Mundlappen gelangen und von ihnen der Mundöffnung zugeführt werden können. Durch Aenderungen in der Richtung der Leisten können die Tiere einen Einfluß auf die Wimperung ausüben; wenn sie keine Nahrung aufnehmen und die Mundöffnung schließen, werden die Fremdkörper von einer Randströmung der Mundlappen fortgeführt. So ist die Wimperung im Mantelraum für das Leben der Acephalen von der größten Bedeutung.

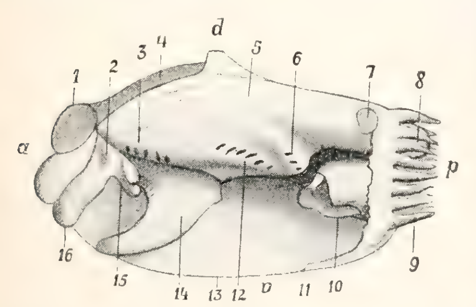


Fig. 8. Körper von Silenia sarsii von der linken Seite nach Abtrennung des Mantels. a vorn, p hinten, d oben, v unten. 1 vorderer Schließmuskel, 2 Mund, 3 vordere, 12 mittlere, 6 hintere Reihe von Kiemenspalten, 4 Leber, 5 Septum, 7 hinterer Schließmuskel, 8 oberer Sipho, 9 Tentakel, 10 Klappe der Einströmungsöffnung, 11 Verwachsung der Mantelränder, 13 Mantelrand, 14 Fuß, 15 16 Mundlappen.

1 g) Fuß und Byssus. Hinter dem Munde tritt an der Bauchseite ein starker muskulöser Fortsatz hervor, der Fuß, der in der Regel beil- oder zungenförmig ist (Fig. 9), seltener stempelförmig oder am Ende scheibenförmig. Er dient zur Ortsbewegung, häufig zum Graben; zuweilen vermag er durch schnelle Stöße gegen den Boden das Tier sprungartig fortzutreiben. In einigen Gattungen kann der Fuß sich stark oder völlig rückbilden. Häufig erzeugt der Fuß in seiner Höhlung einen hornigen Körper, den Byssus, der einerseits an festen Körpern angeheftet, andererseits von der Fußmuskulatur festgehalten wird, so daß sich mit ihm die Muschel verankert; meistens indessen ist der Byssus nicht ein einfacher Stamm, sondern er läuft in Fäden aus, deren Enden dem Boden angeheftet werden. Er entsteht durch die Absonderung starker Hautdrüsen und ist zuerst zähflüssig, erstarrt aber bald und ist dann meist etwas elastisch, nur bei Anomia erhärtet er durch Kalkeinlagerung. Die Byssushöhle enthält in der Regel mehr oder weniger zahlreiche Falten, die von oben her in sie hineinragen und sie in Fächer teilen; nur selten ist sie unten weit offen, meistens bis auf eine enge Oeffnung geschlossen. Ihr schließt sich nach vorn eine Rinne an, die vorn spaltförmig oder in einer Grube endet, in ihr werden die Fäden erzeugt, die hinten an den Stamm, vorn an den Fremdkörper

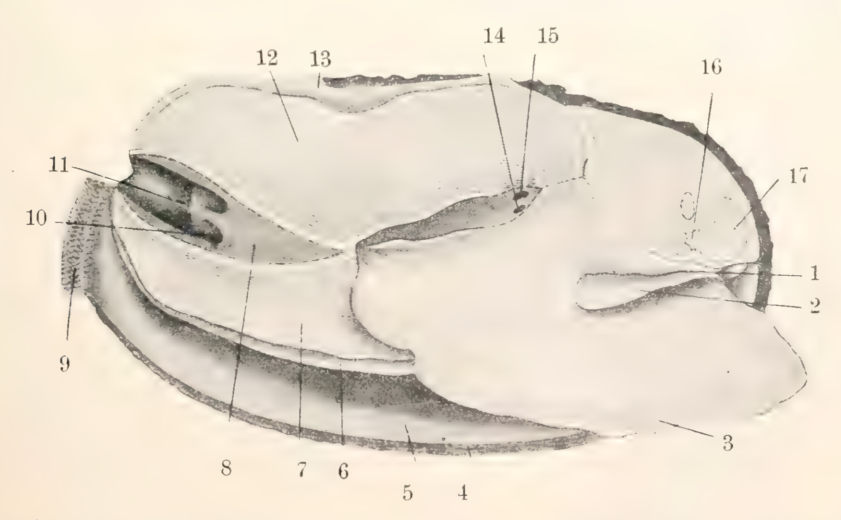


Fig. 9. Anodonta nach Entfernung einer Schalen- und Mantelhälfte. 1 Mund, 2 Mundlappen, 3 Fuß, 4 linke Schalenklappe, 5 linke Mantelhälfte, 6 äußeres 7 inneres Blatt der linken Kieme, 8 innerer Kiemengang, 9 Wärzchen an der Einströmungsöffnung, 10 Ende des äußeren Kiemenganges, 11 After, 12 13 rechte Kieme, 14 Oeffnung der Keimdrüse, 15 Nierenöffnung, 16 Cerebralganglion, 17 vorderer Schließmuskel.

angeheftet werden (Fig. 1). In der Fußspitze findet sich in der Regel eine Vertiefung (Trichter). Häufig bildet sich die Byssusdrüse mehr oder weniger zurück und kann

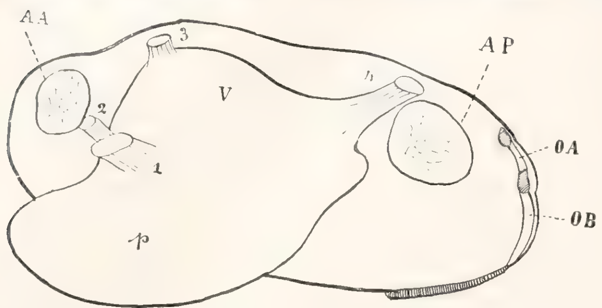


Fig. 10. Muskeln von Pliodon (Unionide). AA vorderer, AP hinterer Schließmuskel, OA OB Aus- und Einströmungsöffnung, V Eingeweide, p Fuß, 1 Vorzieher, 2 vorderer Rückzieher, 3 Heber, 4 hinterer Rückzieher des Fußes.

ganz verschwinden, wofür hauptsächlich die Lebensweise in Sand oder Schlamm der Grund ist. Manche Muscheln spinnen aus dem Byssus ein nestartiges Geflecht, in dem sie sich aufhalten.

1 h) Die Muskulatur. Die Muskulatur besteht aus einigen Gruppen verschiedener Funktion. Am stärksten sind die Schalenschließer, deren vorderer vor dem Schlunde, deren hinterer unter dem Enddarm gelegen ist, doch kann wie erwähnt, der vordere sich rückbilden. Im Mantelrande finden sich hauptsächlich radiäre und dem Rande parallele Fasern; daraus entwickelt sich die bedeutend stärkere Muskulatur der Siphonen, deren Rückzieher jenen, deren Ringfasern diesen entsprechen. Die starke Fußmuskulatur setzt sich nach oben in einen schwächeren Hautmuskelschlauch fort; vom Fuß gehen in der Regel 4 Muskelpaare zur Innenfläche der Schale (Fig. 10), die man als Vorzieher, vorderen und hinteren Rückzieher und Heber des Fußes bezeichnet. Der hintere Rückzieher der Byssusmuscheln wird auch als Byssusmuskel bezeichnet, da er hauptsächlich im Bereich der Byssushöhle liegt und den Byssus gegen die Schale zieht. Bei Pecten und Anomia sind die Fußmuskeln asymmetrisch. Kleinere Muskeln finden sich in den Kiemenachsen und in der Scheidewand der Gruppen mit rückgebildeten Kiemen.

1 i) Das Nervensystem. Das Nervensystem der Zweischaler besteht aus 3 Ganglienpaaren (Fig. 11). Die Cerebralganglien liegen neben dem Schlunde und sind durch eine vor diesem verlaufende Kommissur verbunden; sie versorgen den vorderen Schließmuskel, den vorderen Teil des Mantels und die Mundsegel. Jederseits gehen 2 Connective vom Cerebralganglion aus, das eine kürzere zum Pedalganglion, das mit dem der Gegenseite durch eine sehr kurze Kommissur verbunden ist, das andere längere zu den hinter dem Fuß und unter dem hinteren Schalenschließer gelegenen Visceralganglion. Diesem schließt sich der häufig gangliöse Kiemennerv an und in der meist kurzen Kommissur ist zuweilen eine mittlere Anschwellung bemerkbar; von diesen Ganglien wird hauptsächlich der hintere Schließmuskel und der hintere Teil des Mantels innerviert. Während mit der Rückbildung des Fußes die Pedalganglien verkümmern können, hat die Ausbildung von Siphonen mit ihren Muskeln und Sinnesorganen, aber auch die ungewöhnliche Ausbildung der Sinnesorgane am Mantelrande von Pecten eine bedeutende Entwickelung der Visceralganglien zur Folge.

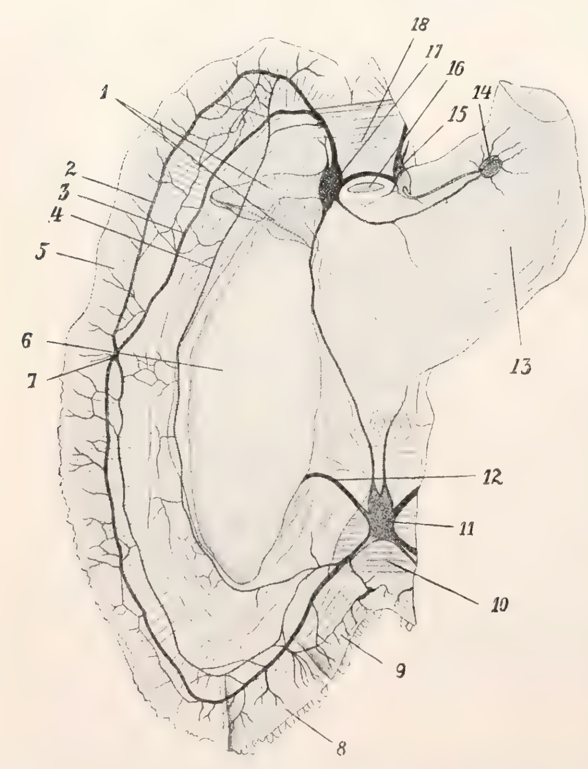


Fig. 11. Nervensystem von Cardium. 1 Mundlappen, 2 bis 4 Mantelnerven, 5 Mantel, 6 Kieme, 7 Knotenpunkt der Mantelnerven, 8, 9 Ein- und Ausströmungsstellen, 10 hinterer Schließmuskel, 11 Visceralganglion, 12 Kiemennerv, 13 Fuß, 14 Pedalganglion, 15 17 Cerebralganglien, 16 Mund, 18 vorderer Schließmuskel.

1 k) Der Darm. Der Darmkanal der Acephalen ist dadurch ausgezeichnet, daß ebenso wie ein äußerlich gesonderter Kopf ihnen eine Mundhöhle nebst der Zunge und deren Reibplatte, Knorpeln und Muskeln, auch die bei Schnecken vorhandenen Speicheldrüsen ganz fehlen. Der Vorderdarm ist überhaupt kurz und ganz einfach; nur bei Nuculiden zeigt er eine Andeutung der Vorderdarmdrüse von Gastropoden. Die Mundöffnung liegt zwischen dem vorderen Schalenschließer und dem Fuß in der Rinne, die von den beiden die Mundlappen verbindenden Falten gebildet wird. Diese Falten können an den Rändern durch ineinandergreifende Fortsätze verschlossen werden, auch ganz miteinander verwachsen, so daß die Mundöffnung in einer nur an den Seiten offenen Röhre liegt.

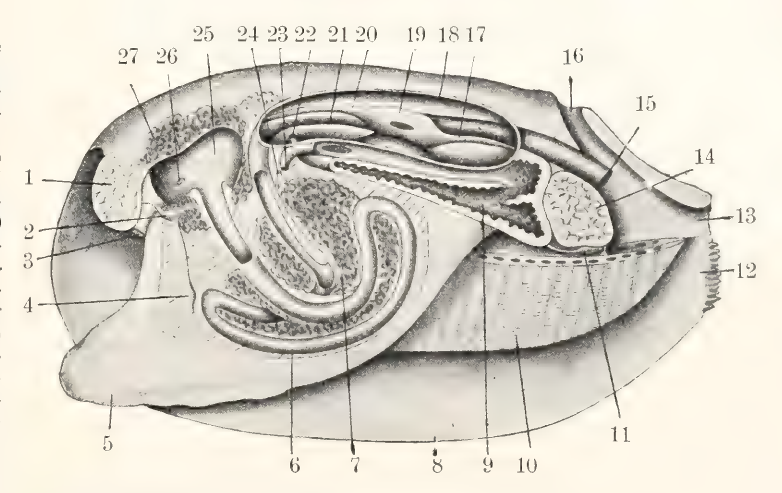


Fig. 12. Anatomie von Anodonta. 1 vorderer Schließmuskel, 2 Cerebralganglion, 3 Mund, 4 Pedalganglion, 5 Fuß, 6 Darm, 7 Keimdrüse, 8 Mantel, 9 Niere, 10 Kieme, 11 Visceralganglion, 12 13 Ein- und Ausströmungsöffnung, 14 hinterer Schließmuskel, 15 After, 16 obere Mantelöffnung, 17 hintere Aorta, 18 Herzbeutel, 19 Herz, 20 vordere Aorta, 21 Darm, 22 Renoperikardialöffnung, 23 äußere Nierenöffnung, 24 Geschlechtsöffnung, 25 Magen, 26 Lebermündung, 27 Leber.

Wie schon erwähnt wurde, wird dem Munde die Nahrung durch die Wimperung der Kiemen und Mundlappen zugeführt, so daß die Mantelhöhle die Funktion der Mundhöhle übernommen hat. Der sackförmige Magen ist in die umfangreiche verästelte Verdauungsdrüse eingebettet, die in ihn mit 2 oder mehr Oeffnungen mündet (Fig. 12). Er hat einen röhrenförmigen Anhang, der einen eigentümlichen gallertigen Körper, den Kristallstiel, enthält; auch die Magenwand ist von einer ähnlichen Abscheidung bedeckt. Der Kristallstiel enthält ein stärkelösendes Ferment. Zuweilen besitzt der Magen noch einen anderen Blindsack.

Der aus dem Magen abgehende Darm bildet meistens einige Windungen; doch ist er zuweilen kaum gewunden. Er verläuft zuletzt über dem hinteren Schließmuskel und mündet hinter diesem mit einer Afterpapille aus.

1 l) Herz und Gefäßsystem. Das Herz der Zweischaler besteht in der Regel aus einer muskulösen Kammer und jederseits einer Vorkammer mit schwächeren Wänden. Die Kammer wird meistens vom Enddarm durchbohrt, nur in einzelnen Gattungen liegt sie über ihm oder unter ihm. Merkwürdig ist das Vorkommen einer paarig symmetrischen Herzkammer bei Arca-Arten, das man als ein sehr ursprüngliches Verhalten ansehen kann, da auch ontogenetisch die Herzkammer aus 2 Hälften entsteht. Das Herz liegt in einem Herzbeutel, der bei Arca-Arten gleichfalls zuweilen paarig ist. Das Herz ist ein Teil des arteriellen Gefäßsystems, indem die Vorhöfe das Blut aus den abführenden Kiemengefäßen aufnehmen und die Kammer es durch die Aorten dem Körper zuführt. Die vordere Aorta, die zumeist über dem Darm liegt, versorgt den Darmkanal nebst der Verdauungsdrüse, die Keimdrüse, den Fuß, die Mundlappen, den vorderen Schließmuskel und den vorderen Teil des Mantels, indessen die hintere gewöhnlich unter dem Darm gelegene Aorta hauptsächlich den hinteren Teil des Mantels und den hinteren Schließmuskel bespült. Aus den Arterien geht das Blut in ein venöses Lakunensystem über (Fig. 13), aus dem es sich in einem unter dem Herzbeutel gelegenen Raum sammelt; alsdann fließt es durch die Nieren zu den Kiemen, um hier wieder arteriell zu werden; ein Teil des aus dem Mantel kommenden Blutes fließt unmittelbar in den Vorhof, besonders bei Arten mit rückgebildeten Kiemen, daher dient auch der Mantel mehr

oder weniger der Atmung. Die Keber sche Klappe befindet sich an der Einmündung der Fußlakunen in den erwähnten Raum unter dem Herzbeutel, ihr Verschluß er-

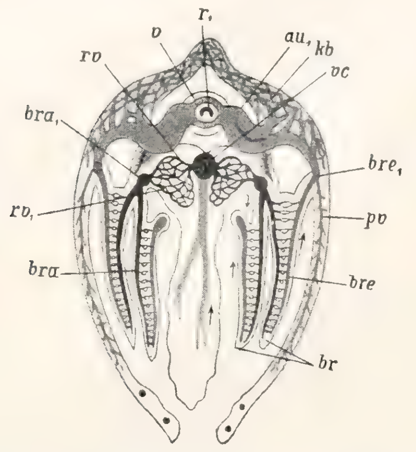


Fig. 13. Querschnitt einer Anodonta. br Kiemen, bre bre_1 Kiemenvene, pv Mantelvene, vc venöser Körpersinus, kb Perikardialdrüse, au_1 Vorhof, r_1 Darm, v Herzkammer, rv rv_1 Nierengefäße, bra bra_1 Kiemenarterie.

möglicht die Schwellung des Fußes. Eine Schwellung der Siphonen vermittelt eine am Anfang der hinteren Aorta befindliche muskulöse Erweiterung, die gegen die Herzkammer durch eine Klappe abgeschlossen ist.

Die Wandung des Herzbeutels ist teilweise drüsiger Natur, und zwar bildet sie teils an den Vorhöfen lappenförmige Faltungen, die in den Herzbeutel hineinragen, teils mehr oder weniger verästelte Schläuche, die sich von den vorderen Winkeln in den Mantel vorstülpen. Diese beiden Formen der „Pericardialdrüse" kommen bald einzeln, bald nebeneinander vor. Ausnahmsweise ist eine solche Drüse an anderen Stellen entwickelt. Ihre Abscheidungen gelangen in den Herzbeutel und durch die Nieren nach außen.

1 m) Die Niere. Die Nieren sind paarig und symmetrisch unter dem Herzbeutel gelegen, mit dem jede durch einen Nierentrichter in offener Verbindung steht, während sie andererseits in die Mantelhöhle ausmündet. Im einzelnen finden sich manche Verschiedenheiten. Bei Arca sind beide Nieren ganz getrennte Säcke mit mehr oder weniger gefalteter Wand, die Ausführungsgänge des Herzbeutels verbinden sich mit dem äußersten Teil der Niere. Bei Nuculiden stehen die Nieren miteinander in offenem Zusammenhang und zwischen dem Ausführungsgang des Herzbeutels, der in den inneren Schenkel der Niere führt, und dem Endteil der letzteren besteht eine Verbindung. Auch sonst kommt es häufig zur Verwachsung beider Nieren. Gewöhnlich ist von dem drüsigen gefalteten Nierensack, der mit dem Herzbeutel zusammenhängt, ein äußerer nicht drüsiger Gang gesondert. In der Regel mündet die Niere an ihrem Vorderende aus und zwar zusammen mit der Mündung der Keimdrüse oder in deren Nähe. Teredo hat eine eigenartige Lagerung der Niere angenommen, indem diese über dem Herzbeutel und ihre Verbindungen mit diesem und mit der Mantelhöhle an ihrem Hinterende liegen (Fig. 14).

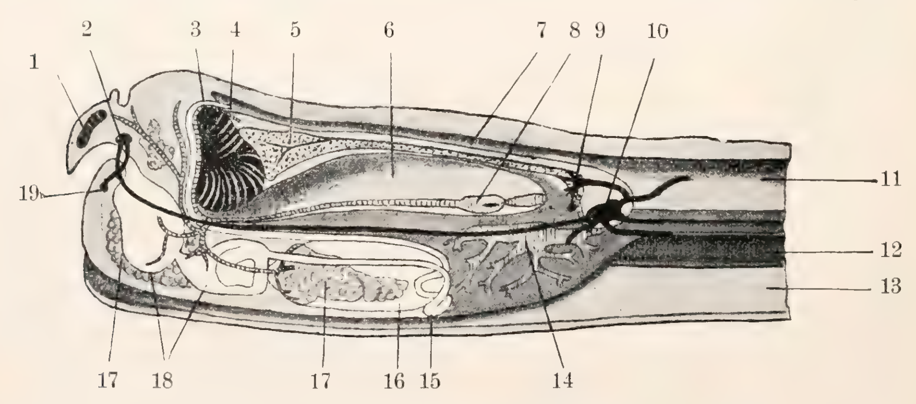


Fig. 14. Anatomie von Teredo. 1 vorderer Schließmuskel, 2 Cerebralganglion, 3 hinterer Schließmuskel, 4 After, 5 Niere, 6 Herzbeutel, 7 Kanal in den der After mündet, 8 Herzkammer, 9 Nierentrichter, 10 Visceralganglion, 11 oberes Fach der Mantelhöhle, 12 Kieme, 13 unteres Fach der Mantelhöhle. 14 Kiemenvene, 15 Darm, 16 Blindsack des Magens, 17 Leber, 18 Magen, 19 Pedalganglion.

1 n) Die Keimdrüsen. Die Keimdrüsen liegen in der Regel im vorderen Teil des Körpers und umgeben haupt-

sächlich die Verdauungsdrüse; sie sind paarig und symmetrisch (Anomia ausgenommen), aus verzweigten Läppchen gebildet. Zuweilen erstrecken sie sich in den

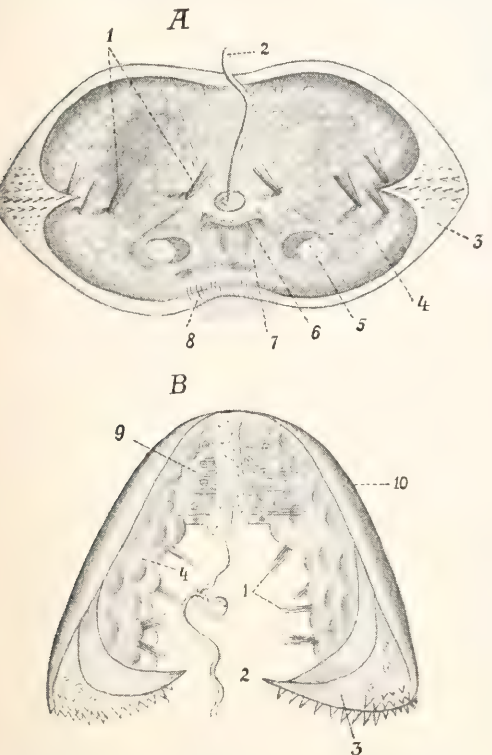


Fig. 15. Glochidium-Larve von Anodonta von unten und der Seite. 1 Sinnesborsten, 2 Klebfaden, 3 Schalenhaken, 4 Scheinmantel, 5 Seitengruben, 6 Mundbucht, 7 Fußwulst, 8 Wimperschild, 9 Schließmuskel, 10 Schale.

Mantel (Mytiliden, Anomiiden) oder in verästelte Fortsätze des Körpers hinein. Der Regel nach sind die Bivalven getrennt geschlechtlich, unter ihnen die ursprünglichsten Gruppen, doch gehen sie nicht selten zur Zwittrigkeit über. Dabei sind verschiedene Grade der Sonderung nachzuweisen, meistens erzeugt dieselbe Drüse Eier und Samen, häufig indessen sind beide Stoffe auf bestimmte Teile der Drüse beschränkt, die aber einen gemeinsamen Ausführungsgang besitzen, bei Anatiniden haben sich beide Teile ganz getrennt und besitzen eigene Ausführungsgänge. Die Ausführungsgänge sind einfach und entbehren aller Vorrichtungen, die zur Begattung dienen, da eine solche niemals stattfindet und nur der in das Wasser entleerte Samen von den Weibchen durch ihre Wimperung aufgeuommen wird oder die abgelegten Eier befruchtet werden.

2. Entwickelung. Aus den befruchteten Eiern pflegt eine frei schwimmende, der Trochophora nahestehende, mit starkem Wimperapparat (Velum) versehene Larve hervorzugehen (Fig. 17). Bei einigen marinen und den meisten Süßwassermuscheln findet Brutpflege statt, indem meistens in den Kiemen die Embryonalentwickelung vor sich geht; in diesem Fall fällt eine Wimperlarve aus. Die Unioniden besitzen ein an den Kiemen oder Flossen von Fischen schmarotzendes Stadium, das Glochidium (Fig. 15). Jede Schalenhälfte läuft in eine mit Dörnchen besetzte Spitze aus, mittels deren diese Larven sich an Fischen anklammern: außerdem besitzen sie als larvale Organe den Larvenfaden, larvale Sinnesorgane in Form von Haarbüscheln (Fig. 15) und einen enormen Schließmuskel, alles Einrichtungen, die die Erreichung der Fische ermöglichen. Durch Hautwucherung dieser werden die Larven dann umwachsen und nehmen hier ihre endgültige Form an.

Die meisten Meeresmuscheln und die Süßwassergattung Dreissena entwickeln sich durch eine schwimmende Flimmerlarve (Fig. 16 und 17), ihr Wimperkranz ist stark entwickelt und meistens von einer vorspringenden Falte, dem Velum, getragen. Wesentlich verschieden ist die Nuculidenlarve (Fig. 18), deren äußere aus 5 Zellringen bestehende Schicht eine Hülle um den eigentlichen Embryo bildet und später abgestoßen wird.

Die erste Anlage der Schale ist einheitlich und wird erst später zweiklappig. Auch bei den Monomyariern wird der vordere Schalenschließmuskel angelegt und später rückgebildet.

3. Systematik. Für die systematische Einteilung der Zweischaler hat man verschiedene Organe verwendet; doch ist jede auf ein einziges Organ begründete Systematik unnatürlich. Die Verwandtschaft der Gruppen untereinander ist zum Teil noch nicht sicher aufgeklärt, indessen kann man die Taxodonten (Arciden und Nuculiden) als die ursprünglichste Gruppe bezeichnen, von der 2 große Entwickelungsreihen ausgehen, deren eine zu den Monomyariern führt, während die andere die große Formenreihe der Dimyarier bildet, unter denen Gattungen wie Teredo, Aspergillum, Cuspidaria die äußersten Ausläufer darstellen. Neuerdings werden häufig einige größere Gruppen auf Grund des Verhaltens der Kiemen aufgestellt; es wurden die Ordnungen Protobranchia, Filibranchia, Pseudolamellibranchia, Eulamellibranchia und Septibranchia vorgeschlagen; ein neuerer Bearbeiter will außer den Protobranchia nur 2 Ordnungen Eleutherorhabda und Synaptorhabda gelten lassen.

Einer der besten Kenner der Molluskensystematik, D a l l , schlägt folgende Einteilung vor, die unter Berücksichtigung der anatomischen Verhältnisse sich hauptsächlich

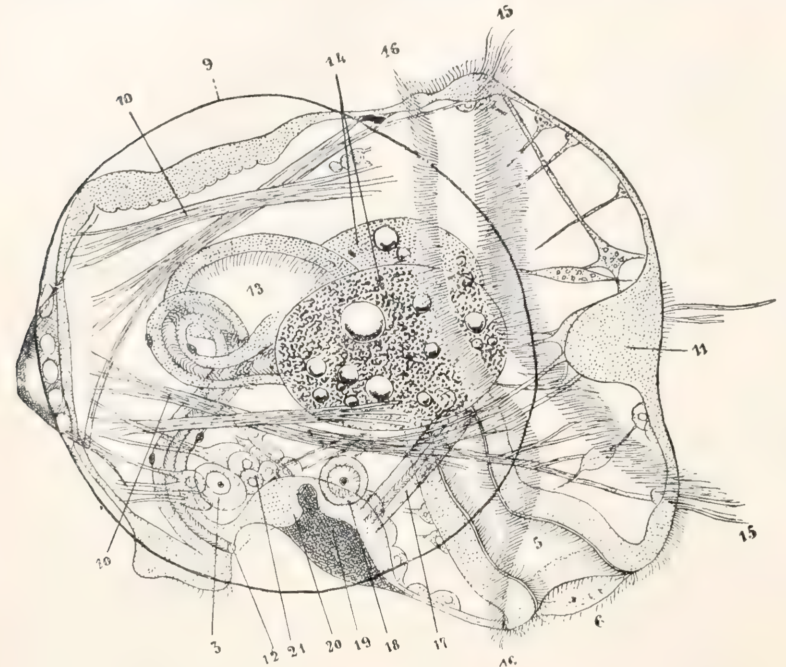


Fig.16. L a r v e v o n T e r e d o. 3 und 21 Mesoderm - Anlage, 5 Schlund, 6 Mund, 9 Schale, 10 Muskeln, 11 Scheitelplatte, 12 After, 13 Mitteldarm, 14 Leber, 15 und 16 Wimperkranz, 17 Urniere, 18 Otocyste, 19 Pedalganglion, 20 Kieme.

Fig. 17. L a r v e n v o n D r e i s s e n a. m Mundgegend, s Schale.

auf Schalenverhältnisse stützt und daher auch von Paläontologen angenommen werden kann.

Ordo P r i o n o d e s m a c e a. Mantel meist offen, ohne Siphonen, Schale meist perlmuttrig und prismatisch, Ligament meist amphidet, Schloß mit gleichartigen Zähnen oder sekundären Erhebungen des Schloßrandes oder zahnlos.

Superfamilia S o l e m y a c e a. Schale dünn, verlängert, mit starkem Periostracum, zahnlos; 2 Schalenschließer; Kiemen mit 2 Reihen von Blättern; Fuß mit einer am Rande gezackten Verbreiterung, ohne Byssus. Familia S o l e m y i d a e.

Subordo T a x o d o n t a.

Superfamilia N u c u l a c e a. Schale gleichklappig, mit glattem Periostracum, perlmutter- oder porzellanartig, Schloß taxodont, Ligament amphidet; 2 Schalenschließer; Kiemen mit 2 Blattreihen, Fuß mit gezackter Verbreiterung, ohne Byssus.

Familiae N u c u l i d a e und L e d i d a e.

N u c u l i d a e. Schale innen perlmuttrig, Mantel ohne Siphonen.

L e d i d a e. Schale porzellan- oder etwas perlmutterartig, mit Siphonen.

Superfamilia A r c a c e a. Schale kahnähnlich oder rundlich, meist mit borstigem Periostracum, porzellanartig, Schloß taxodont, Ligament meist äußerlich; 2 Schalenschließer, Kiemen mit 2 Fadenreihen, Mantel offen, Fuß häufig mit einfachem Byssus, Herzkammer zuweilen paarig.

Familiae M a c r o d o n t i d a e, L i m o p s i d a e, A r c i d a e.

M a c r o d o n t i d a e. Hintere Schloß-

zähne verlängert, mehr oder weniger dem Schloßrande parallel.

Limopsidae. Schale rundlich, Ligament teilweise eingesenkt, Fuß lang und schmal, vorn und hinten ausgezogen.

Arcidae. Schale kahnförmig oder rundlich, hintere Hälfte länger, Fuß kurz und kräftig.

Subordo Schizodonta. Die Zusammenstellung der Pteriacea und Ostreacea mit den Najadacea und Trigoniacea dürfte anfechtbar sein. Der Name Schizodonten ist ursprünglich nur den beiden zuletztgenannten Gruppen gegeben worden.)

Superfamilia Pteriacea. Schale verschieden geformt, meist dreieckig oder geflügelt, die Innenschicht perlmuttrig, die äußere prismatisch, Kiemen mit gefalteten und zurückgebogenen Fadenreihen, die mehr oder weniger untereinander verbunden sind; Mantel offen, ohne Siphonen, vorderer Schalenschließer klein oder fehlend; Schloß zahnlos oder mit wenigen unregelmäßigen Zähnen; Fuß meist mit Byssus.

Familiae Pinnidae, Pernidae, Pteriidae, Vulsellidae.

Pinnidae. Schale dreieckig, hinten offen, zahnlos, mit innerem Ligament; vorderer Schließmuskel klein; Tier mit einem wurmförmigen Anhang über dem After und einer eigentümlichen Drüse über der Oberlippe.

Pernidae. Schale ungleichklappig mit breitem hinteren Flügel, zahnlos, Ligament mit mehreren Verdickungen; vorderer Schließmuskel rückgebildet.

Pteriidae. Schale der vorigen ähnlich, Ligament einfach.

Vulsellidae. Schale nicht geflügelt, austerförmig, sonst der vorigen ähnlich, Tier ohne Byssus; in Spongien lebend.

Superfamilia Ostreacea. Schale ungleichklappig, festgewachsen, meist zahnlos, mit einem Schließmuskel; Fuß rückgebildet, Kiemen und Mantel ähnlich wie in der vorigen Gruppe, Familia Ostreidae.

Superfamilia Najadacea. Schale in der Regel verlängert, gleichklappig, mit 2 Schließmuskeln, perlmuttrig mit starkem Periostracum und mit sekundären Zähnchen oder zahnlos, Ligament meist äußerlich und opisthodet; Kiemen blattförmig, gegittert, Mantel offen, nur unter der Ausströmungsöffnung verwachsen; Fuß beilförmig, ohne Byssus; Brutpflege; Vorkommen im Süßwasser.

Familiae Unionidae, Mutelidae, Etheriidae.

Unionidae. Entwickelung mit „Glochidium"; Wirbel in der Regel skulptiert.

Mutelidae. Entwickelung mit „Lasidium"; Wirbel glatt; wenn Schloßzähne vorhanden sind, bestehen sie aus zahlreichen Knoten.

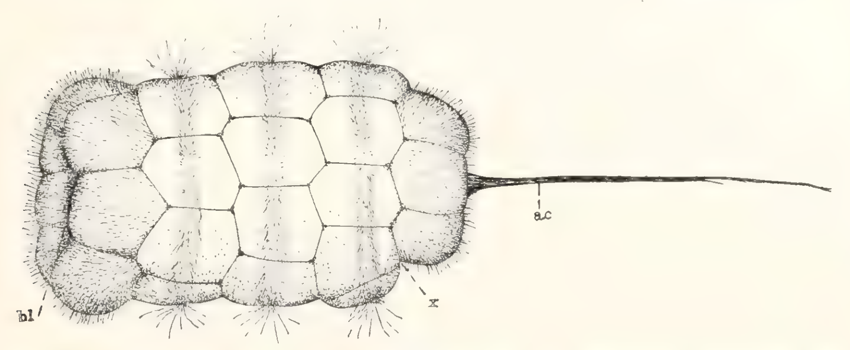
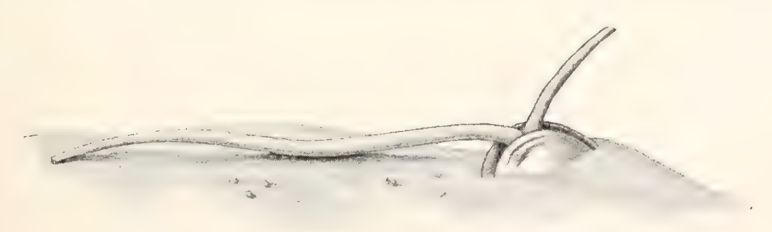


Fig. 18. Larve von Yoldia. ac Wimperschopf, bl Blastoporus, x Gegend des Cerebralganglion.


Fig. 19. Scrobicularia im Schlamm steckend.

E t h e r i i d a e. Schale festsitzend, unregelmäßig geformt, zahnlos, mit großem Knorpel; Fuß mehr oder weniger rückgebildet.

Superfamilia Trigoniacea. Schale gleichklappig, perlmuttrig, mit 2 Schließmuskeln, mit wenigen sekundären Zähnchen, Ligament äußerlich, opisthodet; Kiemen mit Fadenreihen, Mantel offen, Fuß lang, Byssusdrüse rückgebildet, ohne Brutpflege, marin. Familia T r i g o n i i d a e.

Subordo I s o d o n t a. Schloßzähne fehlend oder sekundär.

Superfamilia Pectinacea. Schale meist ungleichklappig, fächerförmig, in der Regel mit einem Schließmuskel, Ligament amphidet; Kiemen mit Fadenreihen, Mantel offen, mit fadenförmigen Anhängen und zuweilen mit Augen am Rande, Fuß klein, mit Byssusdrüse.

Familiae Pectinidae, Spondylidae, Dimyidae, Limidae.

P e c t i n i d a e. Schale in der Regel nicht angewachsen, ohne deutliches Schloß.

S p o n d y l i d a e. Schale festgewachsen, mit starken Zähnen.

D i m y i d a e. Schale austerförmig, mit 2 Schließmuskeln.

L i m i d a e. Schale gleichklappig, meist weiß, Mantelrand mit zahlreichen tasterartigen Anhängern.

Superfamilia Anomiacea. Schale meist ungleichklappig, angewachsen oder den verkalkten Byssus umgebend, mit einem Schließmuskel, Ligament amphidet; Kiemen mit Fadenreihen, Mantel offen, ohne Augen, Fuß klein. Familia Anomiidae.

Subordo Dysodonta.

Superfamilia M y t i l a c e a. Schale meist gleichklappig, Wirbel meist weit nach vorn gerückt, mit kleinem vorderen und großem hinteren Schließmuskel, starkes, zuweilen behaartes Periostracum, Ligament meist opisthodet und äußerlich; Kiemen mit Fadenreihen, Mantel mit Anfängen von Siphonalbildung, Fuß fingerförmig, mit Byssus. Marin und im Süßwasser.

Familiae Mytilidae, Dreissenidae, M o d i o l a r c i d a e (?), Prasinidae (?).

M y t i l i d a e. Schale ohne inneres Septum, Mantelränder nur unter der Analöffnung verwachsen; Fadenkiemen.

D r e i s s e n i d a e. Schale vorn mit einem Septum, an dem der vordere Schließmuskel und der Vorzieher des Fußes sich ansetzen, Mantel mit Siphonen; Gitterkiemen.

M o d i o l a r c i d a e. Mantel weit geschlossen, Schließmuskel ziemlich gleichgroß.

Ordo A n o m a l o d e s m a c e a. Mantellappen mehr oder weniger weit verwachsen, so daß 3 oder 4 Oeffnungen bleiben, Siphonen wohlentwickelt, 2 Schließmuskeln, Schale meist perlmuttrig, Ligament opisthodet, meist mit innerem Knorpel, häufig ungleichklappig, Schloßzähne schwach oder fehlend; meist zwittrig; marin.

Superfamilia Anatinacea. Kiemen gefaltet, mit Verbindungen zwischen den inneren Grenzfilamenten, das äußere Blatt aufwärts gewendet, eine einfache Lamelle bildend. Ohne Kalkröhre außer der Schale.

Familiae Pholadomyidae, Anatinidae, Periplomidae, Thraciidae, Myochamidae, Pandoridae, Lyonsiidae, Chamostreidae.

P h o l a d o m y i d a e. Schale dünn, gleichklappig, zahnlos, Ligament äußerlich; Siphonen verwachsen, nackt.

A n a t i n i d a e. Schale ziemlich gleichklappig, mit innerem Knorpel; Siphonen mit horniger Haut.

P e r i p l o m i d a e. Schale deutlich ungleichklappig, mit innerem Knorpel; Siphonen ganz getrennt, nackt.

T h r a c i i d a e. Schale nicht perlmuttrig, ungleichklappig, Knorpel hauptsächlich äußerlich; Siphonen getrennt, bis zum Ende einstülpbar.

M y o c h a m i d a e. Schale sehr ungleichklappig, zuweilen festsitzend, Dorsalrand der einen Klappe den der anderen überragend; Siphonen mäßig lang, getrennt.

P a n d o r i d a e. Schale zusammengedrückt, frei, festwandig; Siphonen kurz, getrennt, untere Oeffnung mit einer Klappe; Fuß ohne Byssus.

L y o n s i i d a e. Schale dünn; Siphonalklappe unbedeutend; Fuß ohne Byssus.

C h a m o s t r e i d a e. Schale festgewachsen, vor dem Knorpel in der rechten Klappe ein Zahn; Fuß ohne Byssus.

Superfamilia E n s i p h o n a c e a. Eine Kalkröhre schließt eine oder beide Schalenklappen ein, ihr Vorderende hat meist eine durchbohrte Scheibe und eine Krause kleiner Kalkröhrchen. Familia Clavagellidae.

Superfamilia Poromyacea. Kiemenblätter schmal, häufig stark rückgebildet, meist netzförmig, mit starker Ausbildung einer horizontalen Scheidewand (Septibranchia); Schale ohne Kalkröhre; Mantelrand verwachsen mit Siphonen und einer Oeffnung für den Fuß. Familiae Verticordiidae, Poromyidae, Cuspidariidae.

V e r t i c o r d i i d a e. Schale perlmuttrig, mit einem Zahn vor dem Knorpel der rechten Klappe, außen rauh; Kiemen noch deutlich entwickelt, aber schmal.

P o r o m y i d a e. Schale rundlich, perlmuttrig, Zähnchen vor dem Knorpel undeutlich; Kiemen aus kleinen Gittern im Septum gebildet.

C u s p i d a r i i d a e. Schale nicht perlmuttrig, mit hinterem Schnabel; Kiemen

aus einfachen Reihen von Löchern im Septum gebildet.

Ordo Teleodesmacea. Kiemenblätter glatt oder gefaltet, netzförmig, Schale porzellanartig, meist gleichklappig, mit 2 Schließmuskeln, Schloß mit deutlich unterschiedenen Haupt-(Kardinal-) und Neben- (Lateral-) Zähnen, deren letztere indessen fehlen können; Ligament opisthodet, mit oder ohne Knorpel; Mantel in der Regel mit wohlentwickelten Siphonen; Fuß selten mit bleibendem Byssus. Die Tiere leben meist in der Oberfläche des Bodens eingegraben; Geschlechter in der Regel getrennt; mit wenigen Ausnahmen marin. Die Einteilung nach dem Schloß in Diogenodonta, Cyclodonta, Teleodonta und Asthenodonta ist wenig scharf.

Superfamilia Cypricardiacea. Mantel unten teilweise geschlossen, vordere Nebenzähne undeutlich oder fehlend. Familia Pleurophoridae.

Superfamilia Astartacea. Schale in der Regel konzentrisch skulptiert. Mantel unten offen, Nebenzähne undeutlich von den Hauptzähnen getrennt. Familiae Astartidae, Crassatellitidae.

Astartidae. Schale rundlich oder dreieckig, gleichklappig, Ligament äußerlich.

Crassatellitidae. Schale mehr oder weniger geschnäbelt, etwas ungleichklappig, Ligament innerlich.

Superfamilia Cyrenacea. Süßwasserformen, deren Anatomie der der Cypricardien ähnlich ist. Familiae Cyrenidae, Sphaeriidae.

Cyrenidae. Schale ziemlich groß und dick, Hauptzähne an der Spitze gekerbt.

Sphaeriidae. Schale klein, meist 2 sehr dünne Hauptzähne.

Superfamilia Carditacea. Aehnlich den Astartacea, Schale mit Radialskulptur und verlängertem hinteren Hauptzahn. Familia Carditidae.

Superfamilia Chamacea. Schale festgewachsen, sehr ungleichklappig. Familia Chamidae.

Superfamilia Lucinacea. Narbe des vorderen Schließmuskels schmaler, nach unten verlängert, hintere kürzer, rundlich, Mantellinie einfach, Fuß verlängert, keulenförmig, Schloß schwach, Zähne radial, häufig rückgebildet. Familiae Lucinidae, Diplodontidae, Cyrenellidae, Cryptodontidae.

Lucinidae. Schale rundlich, Mantelrand dick, glatt; Kieme ohne äußeres Blatt.

Corbidae. Schale queroval, am Rande gezähnelt, außen stark skulptiert, Mantelrand doppelt gefranst.

Diplodontidae. Schale rundlich, glattrandig; Kiemen mit äußerem Blatt.

Cyrenellidae. Schale und Kiemen der vorigen ähnlich, mit starker Oberhaut; beide Siphonen lang, bis zum Ende verwachsen; in Süß- und Brackwasser.

Cryptodontidae. Schale glatt, meist mit einer hinteren Einbiegung, Schloßzähne fehlend oder ein undeutlicher Hauptzahn rechts; äußeres Kiemenblatt aufwärts gerichtet.

Superfamilia Leptonacea. Einströmungsöffnung vorn im Mantelrande; dieser zuweilen über die Schale umgeschlagen; Tier oft kommensal oder parasitisch, zuweilen lebhaft kriechend; meist zwittrig. Familiae Leptonidae, Galeommidae, Chlamydoconchidae, Kelliellidae(?).

Leptonidae. Schale mit Oberhaut, Mantelrand ausgedehnt, häufig mit Tastern, nicht dauernd über die Schale umgeschlagen.

Galeommidae. Schale ohne Oberhaut, unten weit offen, dauernd zum großen Teil vom Mantel überzogen.

Chlamydoconchidae. Mantel dick, das ganze Tier einhüllend, ohne Schließmuskeln.

Superfamilia Cardiacea. Mantelrand hinter den Siphonen frei, Fuß meist lang, geknickt; Schalenskulptur meist radial, Hauptzähne kegelförmig, Seitenzähne kurz, von den Hauptzähnen entfernt. Marin und im Süßwasser. Familiae Cardiidae, Adacnidae.

Cardiidae. Fuß lang, Mantellinie einfach, ohne Analsipho, Schloß wohlentwickelt.

Adacnidae. Fuß kurz, Schale mit undeutlichem Schloß und Mantelbucht, Siphonen lang, verwachsen, in Süß- und Brackwasser.

Superfamilia Tridacnacea. Tier in der Schale stark nach vorn gedreht, ohne vorderen Schließmuskel, hinterer mitten in der Schale; Hauptzähne schräg. Familia Tridacnidae.

Superfamilia Isocardiacea. Mantel unten bis auf ein Loch für den Fuß geschlossen, Fuß kurz, zusammengedrückt; Schalenskulptur schwach oder konzentrisch, Hauptzähne lamellenförmig, dem Rande parallel. Familiae Isocardiidae, Callocardiidae.

Isocardiidae. Schale mit stark vortretenden Wirbeln, rundlich.

Callocardiidae. Wirbel wenig vortretend, Schale länglich.

Superfamilia Veneracea. Kiemen meist deutlich gefaltet, eine deutliche Analkammer bildend, Mantellappen hinter der Siphonengegend frei, Schließmuskeln ziemlich gleichgroß, Ligament äußerlich, in eine Grube gebettet. Familiae Veneridae, Petricolidae, Glaucomyidae.

Veneridae. Schale am Rande mehr oder weniger gezähnelt, mit deutlichem Felde vor den Wirbeln; Siphonen mäßig lang, mehr oder weniger verwachsen.

Petricolidae. Schale glattrandig mit schwachen Wirbeln und undeutlichem

Felde; Siphonen lang, nur am Grunde verwachsen; meist bohrend.

G l a u c o m y i d a e. Siphonen bis zum Ende verwachsen; in Flußmündungen lebend.

Superfamilia T e l l i n a c e a. Siphonen lang, bis zum Grunde getrennt, mit Mantelbucht, Ligament äußerlich, auf Falten sitzend, Schloß mit vorderen und hinteren, häufig rückgebildeten Seitenzähnen, von den 2 radialen Hauptzähnen ist der vordere meist gespalten, der hintere oft rudimentär. Familiae T e l l i n i d a e, S e m e l i d a e, P s a m m o b i i d a e, D o n a c i d a e.

T e l l i n i d a e. Schale zusammengedrückt, vorn gerundet, hinten mehr oder weniger geschnäbelt, schief und klaffend, Knorpel ziemlich äußerlich; Kiemen klein, nicht gefaltet, äußeres Blatt aufwärts gerichtet.

S e m e l i d a e. Knorpel innerlich, Seitenzähne, wenn vorhanden, stärker und weniger entfernt.

P s a m m o b i i d a e. Kiemen gefaltet, das äußere Blatt abwärts gerichtet; Schale mehr gleichklappig mit deutlicher Oberhaut, hinten mehr klaffend, ohne Seitenzähne, bis 3 Hauptzähne.

D o n a c i d a e. Schale dreieckig, geschlossen, rechts mit Seitenzähnen; Siphonen kurz und dick, Fuß sehr groß.

Superfamilia S o l e n a c e a. Schale lang, seitlich zusammengedrückt und schmal, an beiden Enden offen; Fuß verlängert, am Ende angeschwollen, zum Eingraben dienend; Kiemen gefaltet; Schloß ohne Seitenzähne. Familia S o l e n i d a e.

Superfamilia M a c t r a c e a. Schale mit innerem Knorpel, linker Hauptzahn gespalten, unter die 2 rechten greifend, die oben mehr oder weniger verbunden sind; Innenwand des Mantels hinter den Siphonen mit einem lamellenförmigen Sinnesorgan. Familiae M a c t r i d a e, C a r d i l i i d a e (?), M e s o d e s m a t i d a e.

M a c t r i d a e. Schale meist rundlich dreieckig, Siphonen meist mit Oberhaut.

C a r d i l i i d a e. Schale herzförmig, mit stark vortretenden Wirbeln, hinterer Schließmuskel an einer Seite angeheftet.

M e s o d e s m a t i d a e. Aehnlich M a c t r a, aber mit nackten, nicht verwachsenen Siphonen.

Superfamilia M y a c e a. Grabend, mit langen, mehr oder weniger verwachsenen Siphonen, Schale oft ungleichklappig, mit rückgebildetem Schloß; Ligament verschieden, zuweilen asymmetrisch; Mantellappen unten meist weit verwachsen; Kiemenblätter meist glatt, zuweilen gefaltet. Familiae M y i d a e, C o r b u l i d a e, S a x i c a v i d a e, G a s t r o c h a e n i d a e.

M y i d a e. Schale hinten klaffend, Ligament und Knorpel innerlich, ohne Schloßzähne; Siphonen verwachsen, mit horniger Oberhaut, nicht ganz rückziehbar, Kiemen kurz.

C o r b u l i d a e. Schale kaum klaffend, Ligament meist äußerlich, Knorpel innerlich, 1 oder 2 Schloßzähnchen; Siphonen nackt, ganz rückziehbar.

S a x i c a v i d a e. Schale mehr oder weniger verlängert und klaffend, Ligament und Knorpel äußerlich, Hauptzähne schwach ausgebildet; Kiemen in den unteren Sipho verlängert, Siphonen ähnlich wie bei M y a.

G a s t r o c h a e n i d a e. Schale vorn weit klaffend, Ligament und Knorpel äußerlich; das Tier erzeugt häufig eine äußere Röhre; Kiemen verlängert, Siphonen nackt, nicht ganz einziehbar.

Superfamilia A d e s m a c e a. Schale meist ohne Ligament, vorn und hinten offen, zuweilen klein, weiß, Oberfläche gezähnelt, Schloßrand zahnlos, nach außen umgeschlagen, vorderer Schließmuskel nach außen verlagert, so daß er dem hinteren entgegenwirkt; von den Wirbeln springt jederseits ein bandförmiger Fortsatz in das Schaleninnere vor; Tier bohrend. Familiae P h o l a d i d a e, T e r e d i n i d a e.

P h o l a d i d a e. Schale das Tier größtenteils bedeckend, ohne Kalkröhre; Fuß groß, Siphonen ohne Kalkkörper.

T e r e d i n i d a e. Schale sehr klein, das Tier erzeugt eine Kalkröhre; Fuß rückgebildet; Siphonen mit „Palletten“, kalkigen Platten von Schild- oder Federform.

4. **Biologie.** Wegen der eigentümlichen Nahrungsaufnahme durch die Wimperung der Kiemen und Mundlappen sind die Muscheln durchaus auf das Leben im Wasser angewiesen, luftatmende gibt es unter ihnen nicht. Die große Mehrzahl lebt im Meere, nur wenige Gruppen sind in das Süßwasser übergegangen, von denen besonders die Sphaeriiden und Unioniden zu nennen sind.

Die byssusführenden Arten heften sich damit an festen Körpern an und einige Gattungen, wie O s t r e a, S p o n d y l u s, C h a m a, C h a m o s t r e a u. a., sind mit einer Schalenklappe festgewachsen, auch einige bohrende Tiere, wie L i t h o p h a g a, die Clavagelliden und die Pholadiden und Terediniden sind vollkommen festsitzend. Die meisten graben sich in die Oberfläche des Bodens ein, so daß ihre Siphonen daraus hervorragen (Fig. 19) und die Aufnahme und Ausstoßung des Atemwassers bewerkstelligen.

Dementsprechend ist der Fuß meistens zum Einwühlen geeignet, doch können viele mit ihm auch kriechen und in einigen Fällen, wie bei C a r d i u m, S o l e n, vermag er

durch Stöße gegen den Boden Sprünge auszuführen. Nur Pecten und Lima können in erwachsenem Zustande schwimmen, indem sie durch schnelles Oeffnen und Schließen der Schale sich forttreiben.

Die große Mehrzahl der Muscheln lebt in flachem oder mäßig tiefem Wasser, nur wenige sind ausgesprochene Tiefseebewohner, hauptsächlich die Poromyacea mit mehr oder weniger rückgebildeten Kiemen.

Die Muscheln sind über alle Meere und die süßen Gewässer aller Erdteile verbreitet. häufig in sehr zahlreichen Gesellschaften zusammenlebend. Ihre Artenzahl ist freilich beträchtlich kleiner als die der Schnecken. Neben sehr artenreichen und weit verbreiteten Gattungen gibt es einige, deren Artenzahl und Verbreitung eng begrenzt ist. Sie im einzelnen zu benennen, ist hier nicht angängig.

Außer einigen eßbaren Arten, unter denen die Austern und Miesmuscheln am wichtigsten sind, haben die Perlmuscheln am meisten praktische Bedeutung für den Menschen. Die Perlen werden bei den marinen Muscheln durch encystierte Larven von Saug- und Bandwürmern erzeugt, indem diese von Kalkschichten umlagert werden, während sie bei der Süßwasserperlmuschel (Margaritana) auf andere Weise entstehen (vgl. den Artikel „Perlen").

Literatur: ***Fischer,*** *Manuel de Conchyliologie. Paris 1887. — A. Lang, Lehrbuch der vergleich. Anatomie der wirbellosen Tiere 2. Aufl. Mollusca bearb. von* ***Hescheler.*** *Jena 1900. — Korschelt und Heider, Lehrbuch der vergleichenden Entwickelungsgeschichte der wirbellosen Tiere. Lamellibranchiaten bearb. von* ***Korschelt.*** *Jena. 1890. —* ***Pelseneer,*** *Contribution à l'Étude des Lamellibranches Arch. Biologie t. 11. 1891. —* ***Dall,*** *A new Classification of the Pelecypoda. Transact. Wagner Inst. Philadelphia v. 3 pt. 3. 1895. —* ***Ridewood,*** *On the Structure of the Gills of the Lamellibranchia. Philos. Transact. R. Soc. London ser. B v. 195. 1903. —* ***Grobben,*** *Die Pericardialdrüse der Lamellibranchiaten. Ein Beitrag zur Kenntnis der Anatomie dieser Molluskenklasse. Arb. zool. Inst. Wien v. 7. 1888. —* ***Derselbe,*** *Beiträge zur Kenntnis des Baues von Cuspidaria cuspidata Olivi nebst Betrachtungen über das System der Lamellibranchiaten. Arb. zool. Inst. Wien v. 10. 1892. —* ***Rawitz,*** *Der Mantebrand der Acephalen. 3 Teile. Jenaische Zeitschr. v. 22, 24, 27. 1888—1892. —* ***Bernard,*** *Recherches ontogéniques et morphologiques sur la Coquille des Lamellibranches. Ann. Scienc. nat. Zool. ser. 8 v. 8. 1898. —* ***Seydel,*** *Untersuchungen über den Byssusapparat der Lamellibranchiaten. Zool. Jahrb. Anat. v. 27. 1909.*

J. Thiele.

Lamellibranchiata.

Palaeontologie.

1. Einleitendes. 2. Uebersicht über die fossilen Muscheln: A. Isomyaria: a) Taxodonta. b) Heterodonta. c) Desmodonta. B. Anisomyaria. 3. Geologische Bedeutung der fossilen Muscheln.

1. Einleitendes. Fossile Muscheln gehören zu den am häufigsten gefundenen Versteinerungen. Die Zahl der seit dem Unterkambrium nachgewiesenen „Arten" ist auf rund 10 000 zu schätzen, also etwa das Doppelte der Lebenden. Diese gewaltige Formenfülle der fossilen Muscheln einwandfrei in systematisch-phylogenetischer Weise zu ordnen, ist bis heute nicht gelungen. Für die fossilen Formen eignet sich noch am besten das Einteilungsschema nach Muskel- und Schloßbildung. Die Untersuchungen von Jackson und Bernard über die Ontogenie, sowie die — in manchem zu modifizierenden — phylogenetischen Studien von Neumayr und Pelseneer führen zu dem Schluß, daß die zweimuskligen Isomyarier (= Homomyarier) die Vorläufer der Anisomyarier sein müssen. Unter den Isomyaria sind die Typen der Taxodonten mit Reihenzahnschloß sicherlich die primitivsten, aus denen die ungleichzähnigen Heterodonta entsproßten. Wie die Desmodonta mit ± reduziertem Schloß zu den übrigen Isomyariern stehen, ist eine ungenügend gelöste Frage. Die Taxodonten haben jedenfalls auch als Ahnen der Anisomyarier zu gelten. Uebrigens ist die Betonung nur eines Charakters nicht durchaus maßgebend; das beweist die Erwerbung „pseudotaxodonter" Schlösser bei geologisch jüngeren Heterodonten und die Erwerbung der Mantelbucht bei verschiedenen Gruppen zu verschiedenen Zeiten.

Die geologische Aufeinanderfolge der Formen gibt leider keine genügende Hilfe für die Entscheidung der stammesgeschichtlichen Grundfragen. Im Silur, z. T. schon im Tremadoc, dem obersten Kambrium, stehen die Hauptgruppen getrennt neben einander. Das äußerst wenige von kambrischen Formen bekannte sichert das hohe Alter der Taxodonten (†Ctenodonta, †Glyptarca[1]) im Tremadoc) und spricht wohl für den Uebergang von Taxodonten zu Heterodonten (†Cyrtodonta in der Quebecgroup von Canada). Die Isomyarier müssen jedoch schon im Unterkambrium existiert haben, und sicher liegt ihr Ursprung weiter zurück: †Modioloides prisca Walc. aus dem Unterkambrium von New York sieht äußerlich etwa einem Modiolopsiden gleich, Walcott vermutet taxodonte Charaktere

[1]) Ein † vor den Namen bedeutet ausgestorbene Gruppe, Gattung oder Art.

— aber jede Deutung ist unsicher. Eine — die — andere altkambrische „Muschel“ † Fordilla troyensis Barr. ist vielleicht gar ein Krebs.

Kann man die Teilung der Muscheln in Isomyaria (Taxodonta, Heterodonta, Desmodonta) und in Anisomyaria auch für die Zwecke des Paläontologen als die beste und vielleicht die natürlichste bezeichnen, so bleibt abgesehen von der Stellung der Desmodonten und zahlreichen fraglichen Details doch noch immer ein großer, fast unlöslicher Rest: Neumayrs † Palaeoconchae. Das sind dünnschalige, in ihren Formen an heterodonte, desmodonte und anisomyare Typen erinnernde Muscheln aus dem Palaeozoikum, die schloßlos sind, oder deren Schloßrand unter dem Wirbel durch Skulpturrippen gekerbt ist. Neumayr hielt sie für die Grundmasse, aus der die übrigen Muscheln zunächst die Taxodonten und Desmodonten, sproßten. Unter dem Eindruck, daß diese dünnschaligen Muscheln reduzierte Typen sein müssen, hat man versucht, sie bei den übrigen Hauptgruppen aufzuteilen: vorläufige, zunächst noch nicht befriedigende Versuche.

2. Uebersicht über die fossilen Muscheln. A. Ordo Isomyaria (Homomyaria). Muscheln mit zwei gleichgroßen Schließmuskeln. Taxodonta, Heterodonta, Desmodonta.

a) Subordo Taxodonta Neumayr, Prionodesmacea Dall z. T.

Das Schloß der fast immer gleichklappigen Muscheln besteht aus einer größeren Anzahl meist gleicher oder nahezu gleicher Zähnchen, die in einer Reihe angeordnet steil zum Schloßrande stehen, seltener sind die — äußeren — Zähne schief oder dem Rande mehr oder weniger parallel gestellt. Das amphidete Band ist äußerlich oder innerlich. Mantelbucht und Siphonen treten nur bei wenigen jüngeren, abgeleiteten Formen auf. Verbreitung: Oberstes Kambrium (Tremadoc) bis jetzt.

Nuculacea Dall, Arcacea Dall.

1. Nuculacea. Im obersten Kambrium und Silur der Bretagne, von Wales und Nordamerika finden sich kleine, rundliche bis ovale Schälchen — † Ctenodonta Hall, † Cucullella M'Coy — die bei schwachem

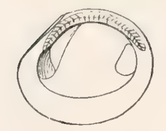


Fig. 1. † Ctenodonta pectunculoides Hall. Unter-Silur, Cincinnati. 2 mal vergrößert. Aus Zittel.

ganz äußerlichem Bande die gleichartigen Zähnchen in einer ununterbrochenen, gebogenen bis fast geraden Reihe zeigen. Solchen primitivsten Taxodonten schließen sich die Familien der Nuculiden und Lediden bereits im Silur dadurch an, daß allmählich die Zahnreihe in zwei Hälften zerlegt wird, zwischen denen eine dreieckige innere Ligamentgrube Platz findet, die bereits im Prodissoconchstadium von Nucula nachgewiesen ist. Bei Nucula Lam. (Silur bis jetzt, besonders häufig im Jura) stehen die beiden, meist ungleichen Abschnitte der Zahnreihe winklig so zu einander, daß der vordere Abschnitt über den hinteren, kürzeren hinübergreift; im Winkel zwischen beiden liegt die schief gestellte Ligamentgrube. In der unteren Kreide zweigt sich eine besondere Gruppe von Formen, Acila Ad., dadurch ab, daß die

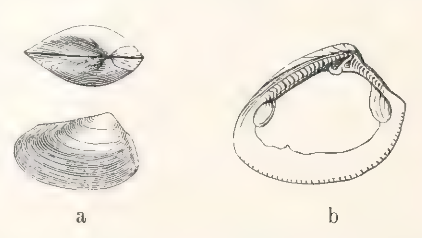


Fig. 2. a Nucula † strigillata Goldf. Obere Trias, St. Cassian, Südtirol; von oben und linke Klappe von außen. b Nucula † nucleus L. Miocän, Grußbach bei Wien; rechte Klappe von innen. Aus Zittel.

meist zarte konzentrische Skulptur von Nucula in solche von schiefen, geknickten Linien umgewandelt wird. Im Silur treten weiter eine ganze Anzahl von Formen auf, die mehr oder weniger deutlich von den Ctenodonten zu dem mit kleiner Mantelbucht und Siphonen ausgestatteten Typus von Leda Schum. hinüberführen. Das Band bleibt zunächst noch äußerlich und die Zahnreihe ungeknickt — † Palaeoneilo Hall (Silur bis Jura), † Phaenodesmia Bittn. (Trias, Jura) — respektive in der Mitte etwas gebogen, wobei die mittleren Zähne schief gestellt werden; oder die Zahnreihe wird scharf geknickt — † Cleidophorus Hall (Silur, Devon) —, und es tritt dann bei Leda (Silur bis jetzt, Blüte im Jura) eine dreieckige kleine Bandgrube zwischen die beiden nicht übereinandergeschobenen Hälften der Zahnreihe. Die Hinterseite der Ledaformen wird besonders bei mesozoischen Arten lang ausgezogen, oben gekantet — Leda † rostrata Sow., † Phaenodesmia Bittn., † Dacryomya Ag. Klaffende Hinterseite besitzt die besonders in Diluvialablagerungen wichtige Yoldia Möll. (Kreide bis jetzt). Die känozoischen Malletia Desm. und Tindaria Bell haben nur äußeres Ligament.

2. Arcacea. Vom Nuculoidentypus spalten sich vermutlich erst im späteren Palaeozoikum die Arcidae († Carbonarca M. u. W.) ab, deren Prodissoconch ein vollkommen ledaartiges Schloß mit dreieckiger innerer Ligamentgrube zeigt, während die erwachsenen Formen über dem

± geraden, langen Schloßrande eine meist große Area mit gewinkelten Rillen für die Anheftung des äußeren Ligamentes zeigen. Von der Gattung Arca Lam. (Trias bis jetzt) mit sehr zahlreichen ± steil stehenden Zähnchen zweigen bereits in der Trias eine Anzahl von Gattungen ab. Bei Cucullaea Lam. (Trias, besonders Jura, bis jetzt) bei †Hoferia und †Arcoptera Bittn. (Trias), stellen sich vor und hinter dem Wirbel wenige lange Zähne mehr oder weniger horizontal. Kürzung und Biegung des Schloßrandes mit Schiefstellung der vorderen und hinteren Zähne und Verkümmerung der mittleren führt in der Kreide zur Bildung der noch lebenden, im Tertiär besonders artenreichen Gattung Pectunculus Lam. mit ± kreisförmigen, meist dicken Schalen. Dadurch daß bei sonst Pectunculus gleichenden, kleinwüchsigen Formen das Band in eine, das Schloß in zwei Hälften teilende, kleine dreieckige Grube tritt, wird der Typus Limopsis Sassi (Trias bis jetzt); Arca — Limopsis bilden also eine Parallele zu †Ctenodonta — Leda bei den Nuculiden. Eigenartig ist das Auftreten eines in der Gestalt an heterodonte Muscheln — Isocardia — gemahnenden Typus: †Isoarca Münst. (Jura, Kreide) mit gewölbter, runder Schale, deren geblähter Wirbel gegen vorn gedreht ist, mit niedriger Area und niedrigen groben Zähnen. Auffallende Kürzung des Schloßrandes zeichnet Nuculina d'Orb. (Tertiär bis jetzt) aus.

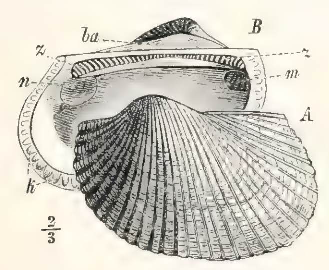


Fig. 3. Arca †diluvii Lam. Pliocaen, Siena, Italien. Linke Klappe, A von außen, B von innen; ba Bandfläche; k gekerbter Rand; m, n vorderer und hinterer Muskeleindruck; z Zähne. Aus Steinmann.

Im älteren Palaeozoikum tritt ein bis heute lebender und seit dem Tremadoc kaum veränderter Typus auf: Macrodon Lyc. (= Parallelodon Meek, Glyptarca Hicks) der gewöhnlich zu den Arcaceen oder Arciden gezählt wird, und dem höchstwahrscheinlich die meisten aus dem Palaeozoikum als Arca beschriebenen Formen angehören. Die verlängerte, schiefwinklig vierseitige Schale hat den Wirbel ganz weit nach vorn gerückt, unter ihm liegt eine lange, niedrige, parallel gestreifte Bandarea. Das Schloß hat vor dem Wirbel mehrere schief gestellte kurze, hinter dem Wirbel wenige, sehr lange, horizontal gestellte, oft fein gekerbte Zähne. Die vorderen Zähne sind schief nach vorn oben gerichtet, nur bei wenigen untersilurischen Formen (Macrodon †antiquus Barrois) gegen den Wirbel zielend. Der heute noch in einer Art lebenden Gattung Macrodon, deren Beziehungen zu Arca nicht voll geklärt sind, wohnt darum besonderer Wert inne, weil sie vermutlich zwischen den Taxodonten — also Isomyariern — und den Anisomyariern (†Pterinea) vermittelt.

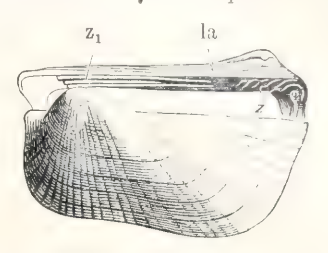


Fig. 4. Macrodon (Parallelodon) †hirsonensis M. u. L. Mittlerer Jura, Großoolith; Minchinhampton, England. Linke Klappe von außen und innen; la Bandarea, z vordere, z_1 hintere Zähne. $1/2$ natürlicher Größe. Aus Zittel.

Die Taxodonten haben in Nucula, Leda, Macrodon auffallend langlebige, konservative Typen entwickelt. Sie haben nur im Silur und Devon eine etwas größere Mannigfaltigkeit entfaltet; sie sind in keiner Formation durch besondere Häufigkeit auffallend.

b) Subordo Heterodonta Neumayr + Teleodesmacea Dall + Prionodesmacea Dall z. T.

Zweimusklige Formen, deren Schloß eine geringe Zahl von Zähnen besitzt: die unter dem Wirbel liegenden kürzeren bis hakenförmigen Kardinalzähne, vor und hinter ihnen ± langgezogene Seitenzähne. Unter dem Einfluß veränderter Lebensweise kann das Schloß sehr weitgehende Umgestaltung erfahren; bei Formen, die in Brack- oder Süßwasser übergehen, können die Zähne verkümmern oder ganz verschwinden. Das fast ausschließlich opisthodete Band ist meistens ein äußerliches, in einer dem hinteren Wirbelrand ± parallellaufenden Rinne liegend, oft von Schalenleisten, Bandnymphen, gestützt. Größere, zurückziehbare Siphonen und Mantelbuchtung treten als spätere Erwerbung erst im Mesozoikum auf. Die Teilung der Heterodonten in Integripalliata und Sinupalliata ist keine scharfe. Heterodonten sind seit dem Tremadoc bekannt.

α) Integripalliata: Trigoniacea, Astartacea, Cyprinacea, Cyrenacea, Megalodontacea, Lucinacea, Leptonacea, Cardiacea, Tridacnacea.

β) Sinupalliata: Veneracea, Tellinacea, Solenacea, Mactracea.

Das riesige Heer der Heterodonten, etwa die Hälfte aller Muscheln, in ganz befriedigender Weise phyletisch-systematisch zu ordnen, ist bei der heutigen Kenntnis besonders der älteren paläozoischen Formen fast unmöglich.

So viel oder so wenig von altpalaeozoischen Heterodonten bekannt ist, darf es ausgesprochen werden, daß enge morphologische Beziehungen zwischen Taxodonten und Heterodonten herrschen. Bei † Lyrodesma Conr., †Actinodonta Phil., †Anodontopsis M'Coy, †Cyrtodonta Bill. — ± gerundet vierseitigen Formen — stehen im Schloß vom Wirbel diver-

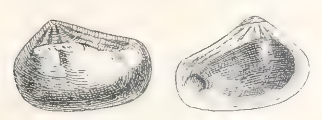


Fig. 5. †Lyrodesma armoricana Trom. et Leb. Unteres Silur, Armorikanischer Sandstein; Guichen, Ille-et-Vilaine, Frankreich. Linke Klappe, Steinkern und Innenseite. 2 mal vergrößert. Nach Barrois.

gierend ausstrahlende Zähne oder Leisten, 1 bis 3 kürzere, hinter denen langgestreckte Leistenzähne liegen, die bei †Lyrodesma z. B. gegen den Wirbel aufwärts gebogen sein können. Hierin ist also mindestens Aehnlichkeit mit der Schloßkonstruktion bei dem alten Taxodontentypus Macrodon zuerkennen. Mit Neumayr sind wohl sicher solche Formen, wie die oben genannten als primitivste Heterodonten zu bezeichnen, von denen in üppigster Mannigfaltigkeit sich umgestaltende Aeste abzweigten.

a) Integripalliata.

1. Trigoniacea (z. T. = Schizodonta Steinmann). Trigoniidae, Cardiniidae, Najadidae.

Trigoniidae. Aus silurischen Formen wie † Lyrodesma sind wohl die „schizodonten" Trigoniaceen entstanden, deren drei- bis schief vierseitige Schalen vorn breit gerundet, hinten ± ausgezogen sind, und deren Wirbel gewöhnlich leicht nach hinten gekrümmt ist. In der linken Klappe steht ein ± plumper dreieckiger, meist von unten her gespaltener Kardinalzahn, vorn und hinten je ein Leistenzahn; rechts stehen zwei von oben divergierende starke Kardinalzähne.

† Schizodus Kef. im Devon bis Perm. † Myophoria Bronn (Unterdevon bis obere Trias) lebte besonders in der Trias mit einer Fülle nach Form, Skulptur, Schloß zu unterscheidenden Gruppen; der Kardinalzahn der linken Klappe kann ungespalten oder gespalten sein, die Zähne werden bei manchen quergerieft. Letzteres gibt besondere Verstärkung des Schloßapparates, die dann bei Trigonia Brug. noch weiter entwickelt wird. Im unteren Lias von Spanien und in Chile sind die ältesten Trigonien gefunden; weltweit in den Meeren des Jura und der Kreide verbreitet produziert die Gattung eine sehr große Zahl von Arten, schnell geht sie im Tertiär zurück und lebt heute als Relikt nur noch in den Flachgebieten des australasiatischen Archipels. Meist sehr grobe Skulptur — konzentrische Leisten, verschieden gerichtete, oft unregelmäßige Reihen von Knoten — verziert die Schale, auf der eine vom Wirbel nach hinten unten ziehende Kante scharf eine große, fast stets



Fig. 6. a † Myophoria laevigata Alb. Unterer Muschelkalk; Rüdersdorf b. Berlin. R rechte, L linke Klappe, z z_1 Kardinalzähne rechts, sz schizodonter Kardinalzahn links. Natürliche Größe. b † Myophoria decussata Mstr. Obere Trias; St. Cassian, Südtirol. Rechte Klappe von außen und Schloß der rechten Klappe mit gekerbten Zähnen. Natürliche Größe. Aus Zittel.

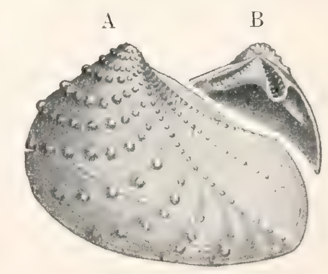


Fig. 7. Trigonia †clavellata Quenst. Oberer Dogger, Württemberg. $^3/_4$ natürliche Größe. Linke Klappe A von außen, mit etwas nach rückwärts gerichteter Wirbelspitze und großem Arealfeld. B von innen, schizodont mit gerieften Zahngruben. Aus von Stromer.

abweichend verzierte Area abgrenzt. Neumayr, Steinmann unterschieden nach Skulpturdifferenzen mehrere große Gruppen der Trigonien.

† Cardiniidae. Vom Myophorientyp zweigt in der Trias der der Cardinien durch nach hinten verlängerte Schalen ab; das Schloß hat lange, starke, hintere Seitenzähne; die Kardinalzähne — bei † Trigonodus Sandb. (Trias) und † Heminajas Waag. (Trias)— noch denen der Myophorien ähnlich, werden bei † Pachycardia Hau. (Trias) kurz, buckelförmig, bei † Cardinia Ag. (Lias) werden sie ganz unterdrückt.

Najadidae. An die ausgestorbenen marinen Myophorien sind nach L. Waagen die Brack- und Süßwasserformen der Najadiden anzuschließen, deren ± langgezogene

Schalen mit dicker Epidermis überzogen sind, und deren Schloß vielfach Reduktionserscheinungen — Anodonta Cuv. (Eocän bis jetzt) ist zahnlos — oder Umbildungen zeigen kann: plumper geriefter Kardinalzahn rechts bei Unio Phil., pseudotaxodontes Schloß bei Iridina. Unionen sind seit der Trias (Texas) bekannt, sehr häufig sind sie im Jungtertiär Osteuropas, wo Arten auftreten, die lebenden aus China und Nordamerika ganz auffallend gleichen.

Zu den vielfältigsten Diskussionen gaben die Najadiden Stoff. Neumayr sah in den Trigonien die Stammform. Steinmann will die lebenden Unio und ihre zahlreichen Verwandten und Untergruppen auf verschiedenen, unabhängigen Stammlinien von verschiedenen Trigoniengruppen ableiten. v. Wöhrmann faßt sie als Trigonodusverwandte auf. King, M'Coy, Amalitzky, Whiteaves halten sie für Nachkommen der in Süß- und Brackwasserbildungen des Devon, des Karbon, Perm und der Trias zum Teil massenhaft auftretenden †Anthracosiidae Am. (†Amnigenia Meek, †Anthracosia King, †Carbonicola M'Coy, †Anthracomya Salt., †Palaeanodonta Am., †Anoplophora Sow.). Das sind Muscheln von meist länglich ovaler Form, gewöhnlich mit dünner Schale und meist nur schwach entwickeltem Schloß, die wahrscheinlich an Pleurophoriden, Modiolopsiden anzuschließen sind.

2. Astartacea. Pleurophoridae, Carditidae, Astartidae, Crassatellidae, Modiolopsidae (und Anthracosiidae?). Silur bis jetzt.

Dickschalige, gleichklappige Muscheln mit 1 bis 3, meist 2 Kardinalzähnen in jeder Klappe, mit kurzem oder fehlendem vorderem und langem, bei jüngeren Typen reduziertem, hinterem Leistenzahn, mit meist äußerem Ligament.

Mit Neumayr ist †Anodontopsis M'Coy aus dem Untersilur von Ohio die Wurzel der Astartacea: gerundet vierseitige Form mit zwei Kardinalzähnen und je einem

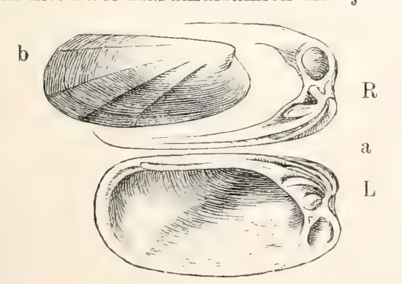


Fig. 8. †Pleurophorus costatus King. a rechte und linke Klappe von innen, mit großem vorderen Muskeleindruck unter dem Schloß. 2 mal vergrößert. Zechstein; Byers Quarry, England. b rechte Klappe von außen (Steinkern). Natürliche Größe. Zechstein; Gera. Aus Zittel.

kurzen vorderen, langen hinteren Leistenzahn. Hieran schließen sich die †Pleurophoridae (†Pleurophorus King, †Cypricardinia Hall, †Cypricardella Hall) an: niedrige, gerundet vierseitige Formen mit vornliegendem wenig vortretendem Wirbel. †Pleurophorus King (Devon bis Trias) gestreckt mit zwei kräftigen divergierenden Kardinalzähnen und hinterem Leistenzahn ist auf der einen Seite verwandt mit den †Modiolopsidae †(Modiolopsis, †Modiomorpha Hall, Silur; †Myoconcha Sow., ? Karbon bis Kreide; †Hippopodium Sow., Jura) meist, mit Ausnahme von Hippopodium schlank eiförmige Muscheln, deren Schloß zahnlos werden kann. Auf der anderen Seite führt †Pleurophorus zu den Carditidae (Trias bis jetzt), meist

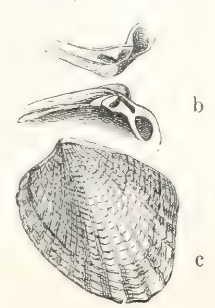


Fig. 9. †Cardita (Palaeocardita) crenata Mstr, obere Trias; St. Cassian, Südtirol. a, b Schloß der rechten und linken Klappe, c linke Klappe von außen. Natürliche Größe. Aus Zittel.

dickschaligen, grob radial und konzentrisch skulpturierten Muscheln, deren älteste, †Palaeocardita Conr., noch einen langen hinteren Seitenzahn besitzt und durch den tiefen, runden, dicht am Rande liegenden vorderen Muskeleindruck auf †Pleurophorus zurückweist. †Cardita Brug. (Trias bis Kreide) von vierseitigem und Venericardia Lam. (Kreide bis jetzt) mit rundlichem Umriß entbehren des hinteren Leistenzahnes; sie haben gewöhnlich links zwei, rechts drei Kardinalzähne. Die Astartidae selbst trennen sich im Karbon von †Pleurophorus durch die kurz vierseitige, grob konzentrisch gefaltete †Astartella Hall (Karbon und

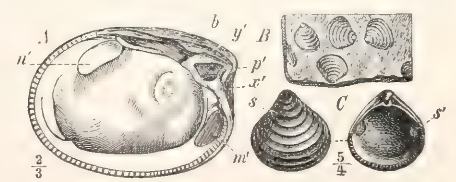


Fig. 10. A Astarte (Crassinella) †obliqua Desh. Unterer Dogger; Bayeux, Frankreich. Linke Klappe von innen, b Bandgrube, m' vorderer, n' hinterer Muskeleindruck, p' Zahngrube für den großen Kardinalzahn der rechten Klappe, x' y' Kardinalzähne. B Astarte †supracorallina d'Orb. Oberer Jura, Kimmeridge; Meuse, Frankreich. C Astarte †Voltzi Hön. Unterer Dogger; Silzklamm, Elsaß. Linke Klappe, s von außen, s' von innen. Aus Steinmann.

Perm). Die sehr artenreiche Gattung Astarte Sow. (Trias bis jetzt) — gerundet drei- bis vierseitig, oval, kreisrund, meist stark konzentrisch gerippt, mit gewöhnlich geperltem Innenrand der Klappen — hat unter dem Wirbel rechts und links zwei kräftige Kardinalzähne, von denen der dreiseitige vorn rechts gewöhnlich besonders stark ist. In marinen Jura-, Kreide- und Tertiärablagerungen sind Astarten in einer großen Zahl von Untergattungen, die namentlich nach Umriß und Skulptur unterschieden werden, häufige Versteinerungen. Von verwandten Formen ist † Opis Defr. (Trias bis Kreide) auffallend durch gewöhnlich hoch dreiseitigen Umriß mit spitzen Wirbeln, unter denen eine sehr große, tiefe, grobkantig begrenzte Lunula liegt. Die in der unteren Kreide abzweigenden Crassatellidae mit Crassatella Lam. (Kreide bis jetzt), Crassinella Guppy (Tertiär bis jetzt), † Crassatellina Meek (Kreide), † Triodonta v. Koen. (Oligocän) mit astartegleichen, doch meist glatten Schalen sind durch innerliches Ligament in rundlicher Grube unter dem Wirbel ausgezeichnet.

Die oben genannte Familie der † Anthracosiidae, würde sich hier anreihen, wenn sie, wie zu vermuten, auf † Pleurophoriden oder † Modiolopsiden zurückzuführen ist.

3. Cyprinacea. ? † Mytilimorpha Hall (Karbon), Cypricardia Lam. (Jura bis jetzt), † Roudeiria M.-Ch. (Obere Kreide), † Anisocardia M.-Ch. (Jura bis Tertiär), Cyprina Lam. (sehr häufig in Jura und Kreide, jetzt nur noch in ein oder zwei Arten). Meist ovale, oft kräftig gewölbte Schalen mit starkem, nach vorn gewendetem Wirbel; im Schloß zwei oder drei Kardinalzähne, deren hinterer bei Cypricardia und Cyprina gespalten sein kann; das lange, äußerliche, opisthodete Band von starken Nymphen gestützt. Die im Jura (vielleicht schon im Karbon ?) erscheinenden und hier wie in der Kreide besonders häufigen Cypriniden sind in allen wesentlichen Merkmalen den Astartiden so sehr ähnlich, daß die Annahme der Stammesgleichheit für beide gefordert werden muß. Das Vorkommen eines längeren, hinteren Leistenzahnes macht L. Waagens Annahme wohl berechtigt, daß die Cypriniden direkt von † Pleurophorus und nicht auf dem Wege über Astarte abzuleiten seien.

4. Cyrenacea. Den Astartiden stammesgleich mögen die heute in brackischen Aestuarien und im Süßwasser lebenden Cyrenacea sein, mit zwei bis drei Kardinalzähnen, vorn einem, hinten zwei langen Seitenzähnen, die bei Corbicula gekerbt sind. Im Lias treten sie zuerst auf; häufig sind sie fossil in Brack- und Süßwasserablagerungen (Purbeck, Wealden u. a. m.) gefunden. Cyrena Lam. und Corbicula Meg. (Lias bis jetzt), Batissia Gray (Obere Kreide bis jetzt), Sphaerium Scop. (Kreide bis jetzt).

5. Megalodontacea, Pachyodonta Neumayr, Megalodontidae, Isocardiidae, Diceratidae (Chamidae), Caprinidae, Rudistae. Silur ?, Devon bis jetzt.

Als Megalodontacea, deren größter Teil die Pachyodonta Neumayrs sind, läßt sich eine große Menge von meist ausgestorbenen Heterodonten zusammenfassen, welche von frei lebenden, regelmäßig gleichklappigen Formen ausgehend die bizarrst umgestalteten, festgewachsenen Muscheln einbegreifen, die überhaupt bekannt sind. Mit Aenderung der Lebensweise, Festheftung in der Wirbelregion der linken oder rechten Klappe, gehen Formänderungen der Schale, Aenderungen des Schalenaufbaus, des Schlosses, des Ligaments, Verlagerungen der Schließmuskeln vor sich, so daß es fast unmöglich ist, eine alle Formen zusammenfassende Diagnose zu geben. Allen gemeinsam ist nur die massige Ausbildung der Kardinalzähne, welche meist als dickbuckelige Höcker erscheinen, seltener leistenförmig ausgezogen sind (Isocardiidae) oder zapfenförmig werden (Rudistae). Von den seit dem (? Silur) Devon bekannten Formen, die im oberen Jura, besonders aber in der Kreide in größerer Zahl lebten und für jene Zeiten geologisch ganz besonders wichtig waren, leben heute nur zwei geringfügige Aeste: Isocardia und Chama.

Megalodontidae. † Megalodon Sow. (Devon, Obere Trias) † Conchodon Stopp., † Lycodon Schafh., † Dicerocardium Stopp. (Obere Trias), † Protodiceras, † Durga G. Böhm (Lias), † Pachyerisma G. Böhm (Trias bis Oberer Jura).

Frech (Res. d. wiss. Erforsch. des Balatonsee I. 1. S. 91) will die Wurzel der Megalodontiden in der silurischen Gattung † Megalomus Hall (; Cyrtodonta Bill.) sehen, einem Typus, der im Schloß primitivste Heterodontie mit Reminiszenzen an Macrodon, also Taxodontie, durch lange hintere Leistenzähne zeigt. Die Gattung † Megalodon, eigentümlich durch das unüberbrückt intermittierende Auftreten im mittleren und oberen Devon dann in alpiner Mittel- und Obertrias, mit dickschaligen Klappen, die kürzer sind als hoch, hat auf kurzer massiger Schloßplatte zwei dicke, buckelige Kardinalzähne, zu denen noch ein vorderer und hinterer Seitenzahn treten kann. Das Band liegt äußerlich in einer weit nach hinten ziehenden Rinne, ist durch Nymphen gestützt. Von den massigen, gegen vorn und leicht gegen außen gedrehten Wirbeln läuft eine stumpfe Kante nach hinten unten. Die überwiegende Mehrzahl der Megalodonarten ist vollkommen bilateral

symmetrisch. Vereinzelt treten besonders in den Riffkalken der alpinen oberen Trias, aus der jetzt eine sehr erhebliche Zahl von Arten bekannt ist, asymmetrische Formen auf: † Megalodon Lóczyi R. Hörn., † Megalodon Laczkoi R. Hörn., deren linke Schale die rechte überragt. Bis in den Oberen Jura — † Pachyerisma, nach G. Böhm mit Cardium verwandt — sind echte Megalodontiden zu verfolgen, von denen einmal die Isocardiiden, dann die Diceratiden abzweigen.

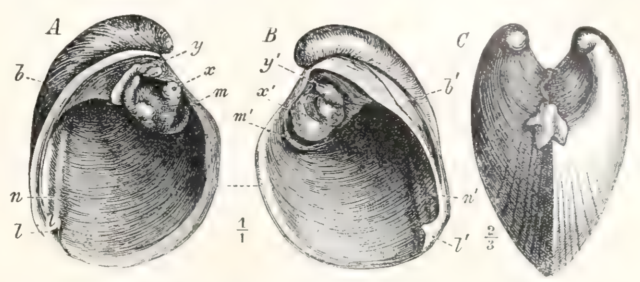


Fig. 11. A, B † Megalodon cucullatus Goldf. Mittel-Devon. Paffrath b. Düsseldorf. A linke, B rechte Klappe von innen; b b′ Bandgrube, m m′ vordere, n n′ hintere, an einer Schalenschwiele (l l′) liegende Muskeleindrücke, x x′, y y′ vordere und hintere Kardinalzähne. C † Megalodon triqueter Wulf. sp. Obere Trias, Dachsteinkalk; Bleiberg, Kärnten. Steinkern von vorne. Aus Steinmann.

Isocardiidae. Von † Physocardia v. Wöhrm., einer von den Megalodontiden der Trias kaum zu trennenden Form mit langen, stark nach außen gedrehten Wirbeln und mit bogig in die Länge gezogenen Kardinalzähnen leitete sich die dünnschaliger werdende und häufig unsymmetrische Isocardia Lam. (Jura bis jetzt) ab, mit liegenden Schloßzähnen und äußerlichem gespaltenem Bande, dessen einer Ast in schmaler Rinne gegen den massigen, zur Seite gedrehten Wirbel hinzieht.

Diceratidae. † Diceras Lam. (Oberer Jura), † Requienia Math. (Untere Kreide), † Monopleura Math. (Untere Kreide), † Caprotina d'Orb. (Untere bis Obere Kreide). ? Chama L. (Kreide bis jetzt). Aus den triadischen Megalodonten, durch das liasische † Protodiceras pumilum Gümb. ist die Form der Diceratiden entstanden: durchweg asymmetrische Gestalten, mit nach vorn hornförmig oder spiralig gedrehten mächtigen Wirbeln, entweder links (normal) oder rechts (invers) aufgewachsen; Umriß der Klappen in der Ebene der Ränder unregelmäßig rund. Das Schloß hat 2:1 dicke plumpe Zähne. Von dem linearen äußeren Bande verläuft ein Ast in langer Rinne gegen die Wirbelspitze. Bei dem riffbewohnenden † Diceras Lam., welches bald normal, bald invers festgewachsen ist, ist die Größe der beiden Klappen meist wenig verschieden. † Requienia Math., in an terrigenen Stoffen reicheren, darum schneller aufgehäuften Sedimenten, dagegen zeigt die festgewachsene linke Klappe, die in Schneckenspirale gewunden ist, sehr groß, die rechte dagegen klein, flach, wie einen Deckel, aber auch spiral gewunden. Aehnliches Größenverhältnis herrscht bei † Monopleura, deren festgewachsene rechte Schale ± kegelförmig, leicht spiral gedreht bis ganz gerade ist; hier bildet die linke einen niedrig gewölbten Deckel. Chama L., seit der Kreide lebend mit niedrigen, blättrig verzierten Schalen, mag hier anzuschließen sein.

† Caprinidae. † Caprina d'Orb. (Cenoman), † Schiosia G. Böhm (Cenoman), † Plagioptychus Math. (Cenoman, Turon), † Coralliochama White (Kreide). Dickschalige, sehr ungleichklappige, rechts angewachsene Muscheln, rechts mit einem, links mit zwei dicken Schloßzähnen. Zwischen einer dünnen äußeren Prismenschicht und dünner, innerer Porzellanschicht befindet sich eine dicke Schalenlage mit groben parallelen Kanälen

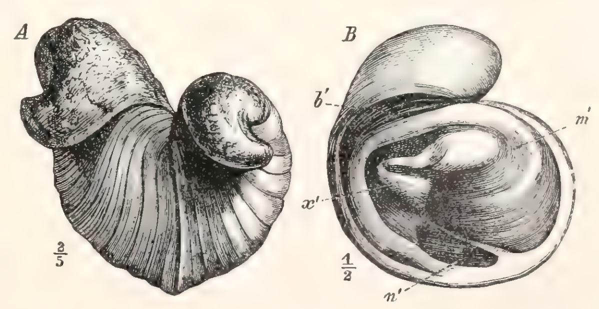


Fig. 12. † Diceras arietinum Lam. Oberer Jura, Oxford; St. Michiel, Meuse Frankreich. A Beide Klappen von vorne; mit der größeren, rechten Klappe (in der Figur links) ist die Schale aufgewachsen. B Freie, linke Klappe von innen, b′ Bandrinne, m′ n′ vorderer und hinterer Muskeleindruck, x′ Ohrförmiger Zahn. Aus Steinmann.

in der freien und großen Hohlkammern in der festgewachsenen Schale. Während bei †Caprina die festgewachsene Schale die kleinere ist, ist bei den anderen Formen die größere Klappe die festgewachsene. In marinen Kalken der unteren Abteilung der

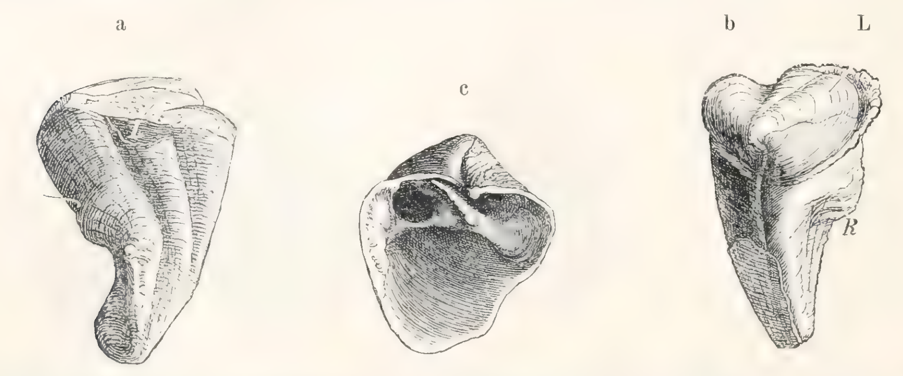


Fig. 13. †Monopleura trilobata d'Orb. Untere Kreide; Orgon, Vaucluse, Frankreich. a zweiklappiges Exemplar von vorn, b von hinten (R rechte, L linke Klappe), c rechte Klappe (Unterschale) von innen. Natürliche Größe. Aus Zittel.

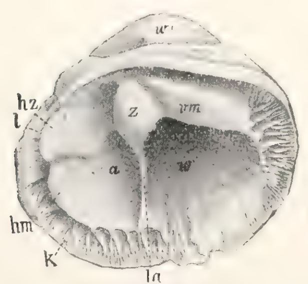


Fig. 14. †Plagioptychus Aguilloni d'Orb. Obere Kreide, Turon; Südfrankreich. Linke Klappe, Innenseite. $^1/_2$. w Wirbel, hm vm hinterer und vorderer Muskeleindruck, hz hinterer Zahn, z Hauptzahn, l Ligamentrinne, a Hohlraum, abgeteilt durch die Lamelle la von dem Wohnraum w des Tieres, k zellige mittlere Schalenschicht. Aus v. Stromer nach Douvillé.

Oberkreide begegnen uns die Capriniden in den Gebieten des mesozoischen äquatorialgerichteten Mittelmeeres sehr häufig.

†Rudistae; Radiolitidae und Hippuritidae. Obere Kreide. Die bei weitem am meisten umgeformten aller Muscheln begegnen uns in den Rudistae. Die rechten festgewachsenen Klappen sind kegelförmig geworden; sie können gewaltige Größen erreichen, in der Kreide der Insel Lesina wurden Schalen von mehr als 1 m Höhe gefunden. Die linken Klappen sind wie flache Deckel gebildet. Die sehr dicken Schalen zeigen besondere Umbildung der Struktur. Das Aequivalent der Prismenschicht in der rechten Klappe ist sehr dick; vertikale Prismen und horizontale Querböden gittern die Schicht. Die ebenfalls dicke Porzellanschicht ist blättrig; entsprechend dem meist wohl schnellen Höhenwachstum der Schalen enthält sie zahlreiche Hohlräume. Auch der Deckel, die linke Klappe, wird aus Prismen- und Porzellanschicht gebildet; bei †Hippurites ist die äußere Lage durch zahlreiche Kanäle, die von außen zum Rande durch die Schale ziehen, eigentümlich porös. Das Schloß ist so modifiziert, daß zapfenartige Zähne des Deckels in entsprechende Gruben der rechten, der Unterklappe, ein-

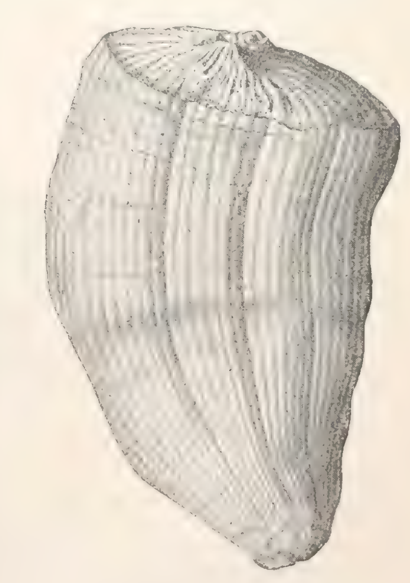


Fig. 15. †Hippurites gosaviensis Douv. Obere Kreide, Turon; Gosau, Ostalpen. Die rechte mit dem Wirbel (Spitze) festgewachsene Klappe zeigt auf der Hinterseite 3 Längsfalten, die der Schloßfalte und den „Säulchen" in der Schale (Fig. 16b A, B, C) entsprechen. Linke Klappe mit stark poröser Außenschicht. $^2/_3$ natürlicher Größe. Nach Zittel aus v. Stromer.

greifen. Die Schließmuskeln legen sich an gerauhte Flächen, bei den Radioliten an besondere Apophysen der Zähne des Deckels und an große Anwachsmarken auf der Innenfläche der großen Klappe. Das — innerliche — Ligament kann wie bei vielen Radioliten in eine besondere Rinne gefaltet sein, oder es kann ganz oder fast ganz reduziert sein. Auffallend geringer Raum bleibt in den außerordentlich massigen Schalen der Rudisten für den Weichkörper, dessen Organisation ,,Säulchen" in der großen Klappe werden bei ihnen als die Lage der Siphonen und des Ligaments bezeichnend angesehen; die Ligament-,,Schloss"-Falte der Hippuriten kann ebenso wie die Ligamentrinne der Radioliten bei geologisch jüngeren Formen verkümmern. Der gefäßreiche Mantel hat auf den Rändern der Schalen häufig unruhig radial strahlende Eindrücke hinterlassen. Bei einem Radiolitiden † Joufia G. Böhm wurden Ausstülpungen des Mantels von der

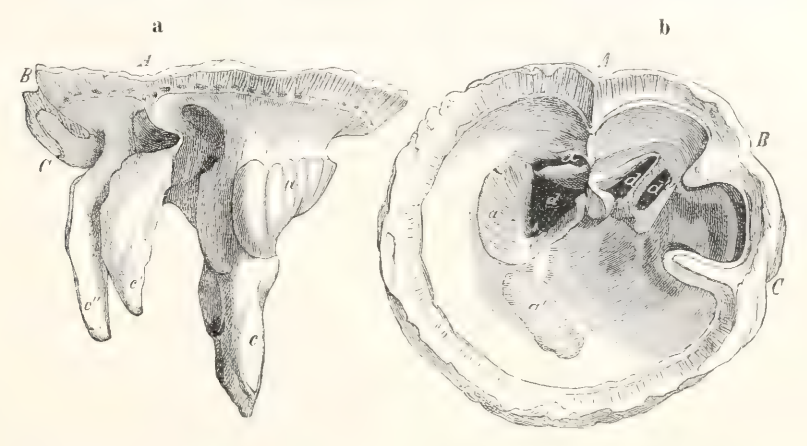


Fig. 16. †Hippurites radiosus Desm. Obere Kreide, Dordonien; Royan, Charente, Frankreich. Aus Zittel. a Linke Klappe, ,,Deckel" von der Seite; a polsterförmige Anheftestelle des Schließmuskels, c vordere, c', c'' hintere Schloßzähne. A, B, C Einschnitte, der Schloßfalte und den ,,Säulchen" der rechten Klappe entsprechend.
b Rechte, untere Klappe von Innen. a, a' Ausatzstellen des Schließmuskels, d Alveole für den vorderen, d' d'' für die hinteren Zähne, u ,,Wohnkammer", x Grube neben der Schloßfalte, A Schloßfalte, B After-, C Kiemen-,,Säulchen".

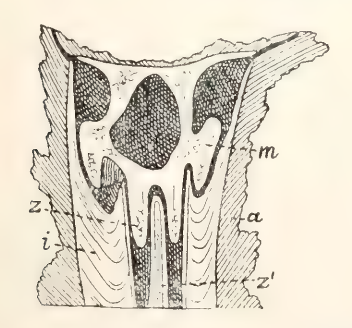


Fig. 17. Längsschnitt durch den Schloßteil eines † Radiolites, um das Eingreifen der Zähne in ihre Alveolen zu zeigen. Nach S. P. Woodward aus v. Stromer. a äußere, i innere Schalenlage, m Apophyse zur Anheftung des Schließmuskels, z Zahn der linken, z' der rechten Klappe.

chamaartig gewesen sein kann; Details sind natürlich so gut wie unbekannt. Randliche Einbuchtungen oder Löcher im Deckel von Hippuriten werden als Austrittsstellen von Siphonen gedeutet, und innere Längsfalten,

Schale umwachsen, so daß ein ,,Durchwachsen des Mantels durch die Schale" eintrat (Steinmann); bei † Barettia Wood ging das so weit, daß die Schale in Pfeilerreihen aufgelöst wurde. Die geringe Kenntnis vom Weichkörper der Rudisten verführte Steinmann dazu, in ihnen beschalte Vorläufer von Tunicaten zu sehen. Häufig sind die einzelnen Individuen dicht aneinander gewachsen, sie bilden ,,Kolonien". Darin wollte Steinmann Koloniebildung durch Knospung sehen. Das Unmögliche solcher Auffassung hat Th. Brandes nachgewiesen (N. Jahrb. f. Min. 1909). Die schwierig zu unterscheidenden Formen hat H. Douvillé auf Grund äußerst sorgsamer Studien nach der verschiedenen Konstruktion der Schalen in eine größere Anzahl von Gattungen und Gruppen geordnet, welche sich insgesamt an Formen wie † Monopleura und dadurch an die Diceratidae oder Megalodontidae anschließen. Solche Ableitung ist wenigstens wahrscheinlicher als die Annahme: die Diceratidae und Rudistae resultierten aus festgewachsenen Cardiidae (H. Douvillé).

In den Kalken und Mergeln der Seichtwassergebiete in der marinen Oberkreide des mesozoischen Mittelmeeres können Rudisten sehr häufig auftreten, in manchen Kalken so eng vergesellschaftet, daß sie riffartige Massen bilden. Doch nicht nur als geologisch aktiv sind die Rudisten von Bedeutung: ihre Beschränkung auf einen äquatorial gerichteten Gürtel gab F. Römer und M. Neumayr Veranlassung, eine tropische marine Zone für die Zeit der Oberkreide zu konstruieren, nördlich von welcher, in Böhmen, Norddeutschland, Schweden, England, ebenso wie südlich, in Ostafrika, die Rudisten sehr viel seltener, nur vereinzelt gefunden werden und meistens kleinwüchsig — degeneriert — sind.



Fig. 18. †Sphaerulites (Radiolites) foliaceus Lam. Obere Kreide, Carentonien; Ile d'aix, Charente, Frankreich. Rechte Klappe von Innen. $^2/_3$ natürlicher Größe. Aus Zittel. a a' vorderer und hinterer Muskeleindruck, d d' vordere und hintere, geriefte Zahnalveole, x x' Gruben neben der Band-(Schloß-)falte A, y Grube am inneren Ende der Bandfalte.

6. Lucinacea. Lucinidae, Diplodontidae, Tancrediidae. ? Silur, ? Devon, Trias bis jetzt.

Die Luciniden (vgl. den Artikel „Lamellibranchiata" S. 8 Fig. 4 B Lucina pensylvanica), mit meist schwachen, oft weit reduzierten Schloßzähnen — gewöhnlich zwei Kardinalzähne, oft ein längerer hinterer und kürzerer vorderer Leistenzahn — mit meistens äußerlichem Band und oft scharf umgrenzter Lunula, sind vielleicht ein sehr alter Zweig der Heterodonten, wenn die silurischen Formen, wie †Prolucina prisca His. sp. und †Paracyclas Hall, wie die permische †Lucina minuta Gein. wirklich mit den sonst erst seit der Trias bekannten Gruppen verwandt bewiesen werden können. Unter den meist flachen, + rundlichen, seltener wie bei †Tancredia Lyc. (Trias bis Kreide) winklig umgrenzten Formen ist die kretazische Gattung †Mutiella Stol. auffallend durch die Erwerbung eines „pseudotaxodonten" Schlosses: schräge Zähnchen an dem vor dem Wirbel aufgebogenen Schloßrande. Die Beziehungen der Luciniden zu anderen Heterodonten sind strittig.

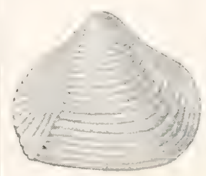


Fig. 19. †Protocardia judaica Hamlin. Obere Kreide, Libanon, Syrien. Rechte Klappe von außen; vorn konzentrisch, hinten radial gerippt. Natürliche Größe. Aus v. Stromer.

7. Leptonacea mit den Galeommidae und Erycinidae sind seit der Kreide, vorwiegend seit dem Tertiär bekannt.



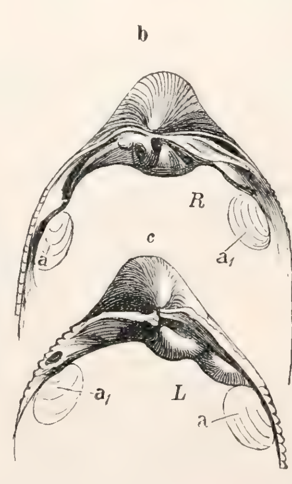


Fig. 20. Cardium †productum Sow. Obere Kreide, Turon; St. Gilgen, Salzburg. **a** linke Klappe, **b** c Schloß der R rechten und L linken Klappe, a a_1 vordere und hintere Muskeleindrücke. Natürliche Größe. Aus Zittel.

8. Cardiacea. Cardiidae, Adacnidae. Trias bis jetzt. Die Cardiiden, eigentümlich durch die Kreuzstellung der zwei und zwei Kardinalzähne beginnen mit der Gattung †Protocardia Beyr. (Trias bis Kreide) in der oberen Trias; radiale Streifung auf der Hinterseite, sonst konzentrische gibt dieser Form eine besondere Note. Die auch heute noch lebenden verschiedenen Untergattungen von Cardium L. beginnen teils im Jura, meist im Tertiär. Von den im Jungtertiär beginnenden Adacniden mit großer Mantelbucht ist Limnocardium Stol. ein im brackischen Miocän Osteuropas sehr häufig vorkommender Typ, dessen heutige Verbreitung der der fossilen Formen sehr nahe kommt.

An die Cardiaceen gemahnt in der äußeren Form ein Teil der in Hunderten von Arten auftretenden „Palaeoconchen" des Obersilur und Devon, die wohl auch als „Cardioconchae" oder „Praecardiidae" bezeichnet werden. Dünnschalige Muscheln, radial, zum Teil auch konzentrisch skulpturiert, zahnlos, oder durch äußere Rippen am Schloßrand gekerbt (also taxodont?) †Praecardium, †Puella, †Panenka Barr. †Cardiola Brod. †Buchiola Barr., †Gloria Barr. und zahlreiche mehr. Diese Formen etwa als Vorläufer der Cardiiden zu betrachten oder sie, wie es Dall tut, zu den „Prionodesmacea" zu stellen, bleibt gleich ungewiß.

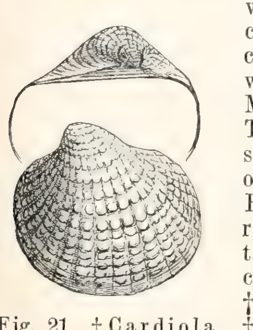


Fig. 21. †Cardiola cornucopiae Gf. Oberdevon; Elbersreuth, Fichtelgebirge. Natürliche Größe. Aus Zittel.



Fig. 22. †Buchiola eifeliensis Beushausen. Oberdevon; Büdesheim, Eifel. Natürliche Größe. Aus v. Stromer.

9. Tridacnacea. Die Tridacnen beginnen mit † Byssocardium M. Ch. und † Lithocardium Woodw. im Alttertiär, Tridacna Brug. und Hippopus Lam. sind nur lebend sicher bekannt. Die Abstammung von Cardiiden scheint sicher.

β) Sinupalliata.

1. Veneracea. Veneridae, Petricolidae (vgl. den Artikel „Lammellibranchiata" S. 8 Fig. 4A Cytherea chione). Nur wenige Gattungen der Veneracea sind ausgestorben: †Pronoe Ag. (Jura), †Cyprimeria (Kreide). Auf das innigste schließen sich die Veneriden an die Cyprinacea an. Jurassische und kretazische Veneriden sind häufig, wenn die Mantelbucht, wie bei

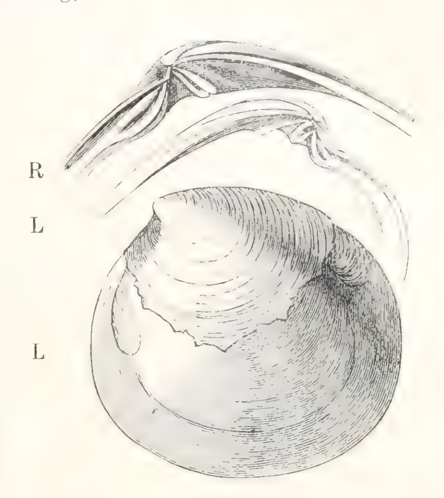


Fig. 23. †Cyprimeria discus Math. sp. Obere Kreide; Gosau. Teilweise beschalter Steinkern der L linken Klappe. Schloß der R rechten und L linken Klappe. Natürliche Größe. Aus Zittel.

†Pronoe und †Cyprimeria nur ganz flach ist, von Cyprina-Arten kaum zu trennen. Fossile Petricoliden sind nicht bekannt.

2. Tellinacea. Tellinidae, Donacidae, Scrobicularidae. Die überwiegende Mehrzahl der Formen, deren erstes Auftreten in den Jura fällt, die aber besonders im Tertiär blühen, gehört noch heute lebenden Gattungen an. Nur wenige, die langovale, hinten schief abgeschnittene Tellinide †Quenstedtia M. a. L. (Jura), die fast gleichseitige Donacide †Isodonta Bud. (Jura), sind ausgestorben.

3. Von den Solenacea lebt Solecurtus Blainv. seit der Kreide, die übrigen Gattungen wie Solen L., Ensis Schum., Cultellus Schum. sind seit dem Tertiär bekannt.

4. Mactracea. Mactridae, Mesodesmidae. Die durch ganz oder zum größten Teil innerliches Band auszeichneten und darin eine Parallele zu den Crassatelliden — Astartacea — bildenden Mactracea mit bei den Mactridae gespaltenem vorderem Kardinalzahn in der linken Klappe sind mit Mactra Linn. seit der Kreide bekannt. Die ganz geschlossenen, ovalen bis gerundet dreiseitigen Mesodesmidae (Tertiär bis jetzt) und die ähnlich umrissenen, hinten öfters leicht klaffenden Mactra (Kreide bis jetzt) besitzen eine nur wenig tiefe Mantelbucht, während bei der von

Mactra abzuleitenden, länger gestreckten, vorn und hinten klaffenden Lutraria Lam. (Tertiär bis jetzt) die Mantelbucht sehr tief ist. Durch den löffelartigen Vorsprung, in dem bei Lutraria das Band liegt, wird diese manchen Desmodonten ähnlich. Bittners Fesstellungen ergaben aber, daß die Mactraceen mit dem Scrobiculariden verwandt, also heterodonte Muscheln sind.

Nur wenige Zweige der Heterodonten — die Trigoniacea, Astartacea und Megalodontacea — lassen sich mit Sicherheit weit bis ins ältere Palaeozoikum zurückverfolgen, schnell blühen die Heterodonten im Mesozoikum, besonders in Jura und Kreide, auf; sehr formenreich werden im Tertiär namentlich die sinupalliaten Gruppen. Keine der größeren Abteilungen der Heterodonten ist ganz ausgestorben, wenn wohl manche stattlichen Zweige, zahlreiche Gattungen, erloschen sind.

c) Subordo Desmodonta (Neumayr) Zittel (= Prionodesmacea Dall z. T. Teleodesmacea Dall, z. T. Anomalodesmacea Dall).

Der Schloßrand der heute meist in Schlamm eingegraben oder in Bohrröhren wohnenden, meist dünnschaligen Muscheln entbehrt der Schloßzähne, oder er trägt unter dem Wirbel kürzere oder längere, bis löffelförmige Fortsätze, die unter oder über den Rand der Gegenklappe greifen, auch — bei innerlichem Bande — als Bandstützen dienen können. Meistens ist das Band ein äußerliches; den in Stein oder Holz bohrenden Adesmacen fehlt es. Die Mehrzahl der paläozoischen Formen ist integripalliat, fast alle meso- und känozoischen sind sinupalliat.

α) Integripalliata (Palaeoconcha Neumayr z. T.): † Solenopsidae (Silur, Trias), † Vlastidae (Ober-Silur), † Grammysiidae (Silur bis Karbon), Solenomyidae (Devon bis jetzt).

Die dünnschaligen, meist schwach skulpturierten Formen mit meistens äußerlichem, linearem, nur bei den Solenomyiden innerlichem Bande treten im Palaeozoikum in erklecklicher Formenmenge auf. Einzelne

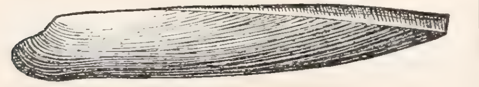


Fig. 24. † Solenopsis pelagica Goldf. Devon, Eifel. Linke Klappe. Natürliche Größe. Aus Zittel.

Typen wie die langgestreckte † Solenopsis M'Coy, † Sanguinolites M'Coy und die mit tiefer Lunula vor dem vorn liegenden Wirbel versehene † Grammysia Vern. gehören z. B. in sandig-schiefrigen Ablagerungen des Devon zu den häufigeren Formen. Allein die lang scheidenförmige, vorn und hinten klaffende Solenomya Lam., mit innerlichem Band lebt — seit der Kreide — noch heute (im Mittelmeer).





Fig. 25. † Grammysia Hamiltonensis Vern. Unter Devon, Spiriferensandstein; Lahnstein, Nassau. a linke Klappe von der Seite, b beide Klappen von vorn. Natürliche Größe. Aus Zittel.

β) Sinupalliata. Anatinacea, Poromyacea, Myacea, Adesmacea.

Besonders in marinen Ablagerungen des Jura und der Kreide finden sich von den Anatinacea sehr häufig die bereits seit dem Untersilur bekannten, dünnschaligen klaffenden † Pleuromyiden († Pleuromya Ag., † Gresslya Ag., Mesozoikum), denen auch

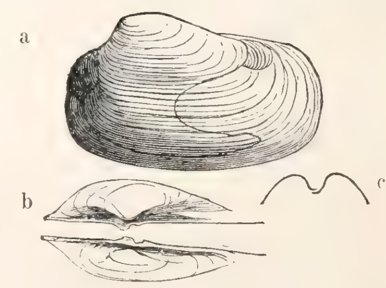


Fig. 26. † Pleuromya peregrina d'Orb. Oberer Jura; Choroshowo, Moskau. a Steinkern, linke Klappe, mit Mantellinie. b Schloß beider Klappen von oben. c Querschnitt, die rechte Klappe greift über die linke. Natürliche Größe. Aus Steinmann.

die Mehrzahl der in der Trias (Muschelkalk) besonders gern als „Myacites" bezeichneten, indifferenten Muscheln angehören. Sehr häufig kommt dort auch die Gattung Pholadomya Sow. in einer Fülle durch Form- und Skulpturdifferenzen gekennzeichneter Gruppen vor, von der heute nur noch eine einzige Art — in atlantischen Wässern — lebt. Die nach hinten verlängerten Anatinen sind mit Thracia Leach seit der Trias, mit Anatina Lam. seit dem Jura lebend,

und die durch gewaltiges, verfestigtes Siphorohr ausgezeichneten Clavagelliden (vgl. den Artikel „Lamellibranchiata" S. 8, Fig. 2 Aspergillum vaginiferum) kennen wir seit der Kreide.



Fig. 27. Pholadomya †Murchisoni Sow. Mittlerer Jura; Norddeutschland. $^2/_3$ natürliche Größe. Aus v. Stromer.

Von den Poromyacea Dall, deren Gattungen seltener sind, ist die etwas ungleichklappige und hinten ledaartig geschnäbelte Cuspidaria Nardo seit der Trias bekannt; die ovale, kräftig gewölbte †Liopistha Meek gehört der Kreide an.

Die durch meist sehr tiefe Mantelbucht und kräftige, löffelförmige Bandstützen ausgezeichneten, häufig weit klaffenden Myacea sind mit der ungleichseitigen Corbula Lam. bis in die Trias zurückzuverfolgen. Die heute weit verbreitete Mya L. lebt seit dem Tertiär, und die hinten besonders weit klaffenden Panopaea Men. kennen wir seit der Kreide. Die bohrenden Gastrochänen sind bis ins Perm zurückzuverfolgen.

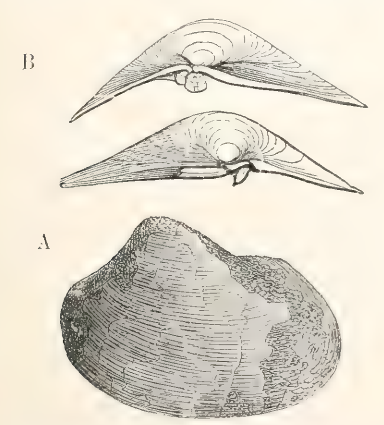


Fig. 28. †Liopistha frequens Zitt. Obere Kreide; Gosau. A linke Klappe, B Schloß beider Klappen mit Bandlöffel und zahnartigem Fortsatz unter dem Wirbel. Natürliche Größe. Aus Zittel.

Die von Dall als Adesmacea zusammengefaßten Bohrmuscheln, die Pholadidae und Teredinidae, treten zuerst im Jura auf; nicht gerade selten sind in ausgefüllten fossilen Bohrröhren die durch ihre Gitterskulptur in der vorderen Schalenhälfte charakteristischen Schalen von Pholas L. gefunden.

Zittel nannte die Desmodonten einen „natürlichen Formenkomplex", welcher sich selbständig neben den Heterodonten entwickelt hat. Das mag der Fall sein, aber es ist kaum zu beweisen. Außerordentlich unsicher ist der Zusammenhang zwischen den paläozoischen und mesozoischen Formen, eigentümlich das rasche Aufblühen im Mesozoikum. Man wird versucht, die Desmodonten als vielleicht untereinander unabhängige, umgestaltete Gruppen anzusehen, die vielleicht auf verschiedene Typen von Heterodonten zurückgehen. Dall versuchte durch die Aufteilung der Desmodonten solchem Gedanken Rechnung zu tragen. Doch noch ist die Phylogenie dieser Formengruppen in ihren Grundlagen ungeklärt.

B. Ordo Anisomyaria Neumayr (= Prionodesmacea Dall z. T.; Heteromyaria; Monomyaria). Meist ungleichseitige, häufig ungleichklappige Muscheln, deren vorderer Schließmuskel meistens klein, öfters ganz verkümmert ist; die Verbindungslinie zwischen den Adduktoren verläuft schief zum Schloßrande. Das Schloß ist entweder zahnlos, oder wird von schwachen Leistenzähnen gebildet, oder es ist isodont. Das Band liegt einer mehr oder weniger langen Bandfläche, „Area", auf, die eine bis sehr zahlreiche Bandgruben aufweisen kann. Nur in wenigen Ausnahmen kommen Siphonen vor. Die Tiere sind freilebend, oder heften sich mit einem Byssus an, oder wachsen mit einer Klappe fest. Unter Aufgabe freier Lebensweise werden die Formen unsymmetrisch. Silur bis jetzt.

Aviculacea, Pectinacea, Ostracea, Mytilacea.

1. Aviculacea. Aviculidae, Pernidae, Pinnidae, Ambonychidae, Vulsellidae, Limidae, Myalinidae, Lunulicardiidae, Conocardiidae. R. T. Jackson nennt in seiner Phylogeny of the Pelecypoda als Ausgangsform der Anisomyarier den Nuculidentypus, an den sich als primitivste Aviculacee die obersilurische Gattung †Rhombopteria Jacks. anschließen soll. Diese — ein ziemlich indifferenter Typ — hat im Verhältnis zu der Höhe der schiefen Schale einen ziemlich kurzen Schloßrand mit wenig abgesetztem, kaum ausgezogenem hinterem Flügel und mit kräftigem vorderem Ohr; auf dem Schloßrand stehen undeutliche Zahnleisten, deren hintere ± horizontal verlängert sind. Hierdurch kommt †Rhombopteria der Gattung †Pterinea Goldf. (Silur bis Karbon, Blüte im Devon) sehr nahe, deren lang gestreckter Schloßrand mit flügelartig verlängertem hinterem und scharf abgesetztem vorderem Ohr ganz auffallende Beziehungen zu dem Schloß von Macrodon unter den Taxodonten

zeigt: vorn, unter und vor dem Wirbel, schräg nach vorn oben zielende kurze Zahnleisten, hinten lange, dem Schloßrande parallele Leisten. Diese Uebereinstimmung im Schloß läßt mindestens die Vermutung als berechtigt erscheinen, daß Macrodon-†Pterinea die Verwandtschaft Taxodonta-Anisomyaria begründen. Auf †Pterinea lassen sich wohl nahezu alle Zweige der Anisomyaria zurückführen, zunächst die Aviculacea, und in ihnen die Familie Aviculidae.

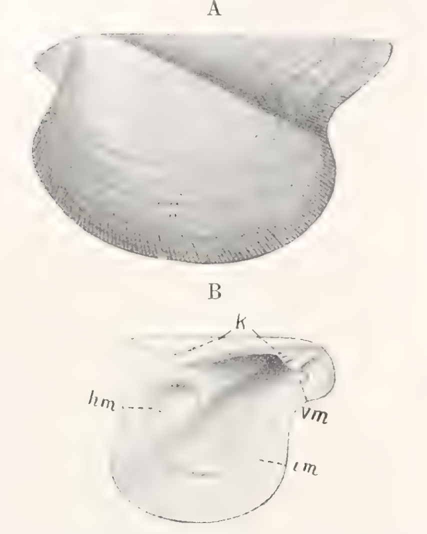


Fig. 29. A †Pterinea lineata Goldf. Linke Klappe von außen. Unterdevon; Niederlahnstein. B †Pterinea fasciculata Goldf. Unterdevon bei Ems. Innenseite der linken Klappe. $^3/_4$ natürlicher Größe. hm hinterer großer, vm im Schwinden begriffener vorderer Muskel, darunter der Byssusausschnitt, k Kerbzähnchen und leistenförmige Zähne, im integripalliate Mantellinie. Aus v. Stromer.

Verlust der Zähne, respektive das Auftreten nur zahnartiger Vorsprünge am unteren Schloßrande, Herausbildung einer ± schiefen, dreiseitigen Grube in der Ligamentarea läßt aus Pterinea den Stamm der Avicula Brug. = Pteria Scop. (Devon bis jetzt) werden, die Familie Aviculidae i. e. S. Meist ist hier die linke Klappe stärker gewölbt als die rechte, das vordere Ohr kurz, in der rechten Klappe unten von einem Byssuseinschnitt begrenzt, das hintere gewöhnlich flügelartig, manchmal sehr lang ausgezogen. Unter den zahlreichen Untergattungen von Avicula, die nach Form, Skulptur, Länge des Schloßrandes zu unterscheiden sind, wird besonders wichtig †Oxytoma Meek (Trias bis Kreide), deren linke Klappe gewöhnlich wesentlich stärker radial skulpturiert ist als die flachere rechte; namentlich in marinen Juraablagerungen wird dieser Typus (Gruppe des †Oxytoma inaequivalve Sow.) besonders häufig gefunden. Avicula †contorta Portl. mit leicht gedrehter Schale ist als charakteristisches Leitfossil der jüngsten marinen Trias (Rhät) bekannt. Die durch besonders starke Perlmutterlage gekennzeichneten Meleagrina Lam. sind seit dem Jura verbreitet. Einzelne Seitenzweige von Avicula werden morphologisch besonders eigentümlich durch die auch bei anderen Anisomyariergruppen öfters sich einstellende auffallende Wölbung der linken Klappe, in der die rechte wie eine flacher Deckel liegt: †Cassianella Beyr. (marine

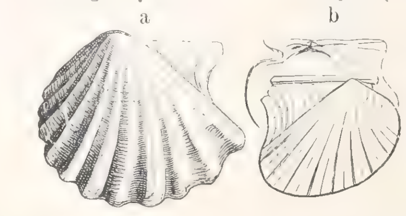


Fig. 30. †Oxytoma costatum Sow. Mittlerer Jura, Großoolith; Luc, Calvados, Frankreich. a linke Klappe von außen, b rechte Klappe von außen und innen. Natürliche Größe. Aus Zittel.

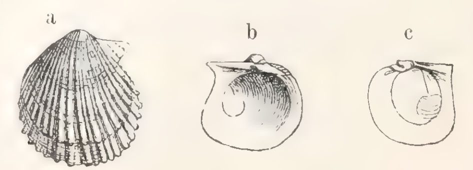


Fig. 31. †Pseudomonotis echinata Sow. Mittlerer Jura, Bathonien; Sutton, England. a linke Klappe von außen, b von innen, c rechte Klappe von innen. Natürliche Größe. Aus Zittel.

Trias alpiner Gebiete) mit langem hohem Schloßrand, schmaler Bandgrube, oft mit grober vorderer und hinterer Kante auf der linken Klappe; †Pseudomonotis Beyr. = Eumicrotis Meek (Devon bis Kreide) ist durch Kürzung des Schloßrandes, Verkleinerung der vorderen Ohren charakterisiert. Manche ihrer Arten, die wahrscheinlich nicht alle stammesgleich sind, treten in großer Häufigkeit und weiter Verbreitung auf und werden zu guten Charakterfossilien, so †Pseudomonotis speluncaria Schloth. sp. im deutschen Zechstein, †Clarai Emmr. im Buntsandstein der Alpen, †ochotica in pazifischen und arktischen Triasgebieten, †echinata Sow. sp. im Bathonien und Callovien des Braunen Jura. Weitergehende Kürzung des Schloßrandes bei stärkerem Wachsen des linken Wirbels läßt aus †Pseudomonotis die Gattungen Aucella Keys. und Aucellina

Pomp. werden, deren erstere im Oberen Jura und in der Unteren Kreide besonders borealer Gebiete sehr häufig ist, aber durch weite, passive Wanderzüge pseudoplanktonisch nach Mittel- und Westeuropa, nach Südostrußland, Himalaya, Kalifornien, Mexiko, Neuseeland verbreitet wurde, und so zu großer paläogeographischer Bedeutung gelangte. Vollkommener Verlust der vorderen Ohren führt von hochwüchsigen Avicula- (oder Pterinea-) Formen zu †Limoptera Hall (Devon, Karbon). Meist flache konzentrisch gestreifte, dünne Schalen mit ver-

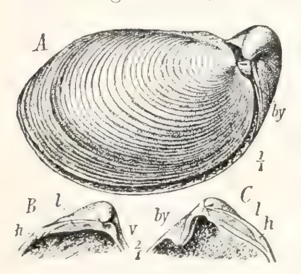


Fig. 32. A. †Aucella Pallasi Keys. Oberer Jura; Simbirsk, Wolga. Aus Steinmann. Fig. 32. BC. †Aucella Keyserlingi Lah. Untere Kreide; König-Karls-Insel. Schloß der linken und rechten Klappe. Nach Pompeckj aus Steinmann. by Byssuseinschnitt, l Bandarea, h hinteres, v vorderes Ohr.

kürztem Schloßrand, ohne abgesetzte Ohren, mit etwas nach vorn verlagertem Wirbel charakterisieren die Gattung †Posidonomya Bronn (? Silur; Devon bis Jura), die in †Posidonomya Becheri in den marinen Schiefern des Unterkarbon, †Bronni im oberen Lias und †Buchi im Braunen Jura weit verbreitete und massenhaft auftretende Leitfossilien lieferte. In der Oberen Trias besonders der alpinen, pacifischen und borealen Gebiete treten flache Aviculiden mit radialen, dünnen Rippen und kurzem Hinterflügel, †Monotis Bronn, und mit flachen Rippenbündeln und langem Hinterflügel, †Halobia Bronn, auf, welche weit verbreitet ebenfalls paläogeographisch wertvoll sind.

Aus Aviculiden mit abgeschwächter Radialskulptur ist die Familie der Pernidae Zitt. (Perm bis jetzt, Blüte in Jura und Kreide) zurückzuführen. Die ursprünglich gleichklappigen ± langgestreckten, häufig sehr dickschaligen Muscheln, in deren Ligamentarea eine kleine bis sehr große Zahl von Bandgruben eingesenkt ist, sind meist zahnlos, oder sie haben unter dem Wirbel am unteren Schloßrande schräge Zahnleisten. Die schief nach hinten unten verlängerte †Gervilleia Defr. (Zechstein [Bakewellia], Trias bis Alttertiär) ist besonders in der Trias (†Gervilleia [Hoernesia] socialis Schloth. sp. im Muschelkalk) und im Jura häufig; ihre Ligamentarea zeigt eine geringe Anzahl grober Bandgruben, am Unterrande schiefe Leistenzähne. Schiefe Drehung der Schale, bei der triadischen Gruppe der †Gervilleia socialis führt verbunden mit besonderem Höhenwachstum und großer Wölbung der Wirbelregion der linken Klappe zu der aus der Trias des Himalaya beschriebenen Gattung †Lilangia Dien., die in ihrer

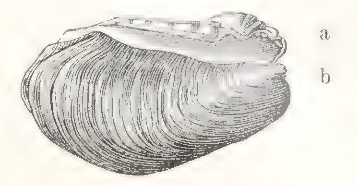


Fig. 33. †Gervilleia (Hoernesia) socialis Schl. Muschelkalk; Würzburg. a linke Klappe mit Schloß und Bandgruben, b rechte Klappe. Nach Zittel.

Form eine Parallele zu †Cassianella bietet. Die gleichklappige Perna Brug. von ± vierseitigem Umriß mit spitzen, vorn liegenden Wirbeln, mit sehr dicker, blättriger Perlmutterschale, mit hoher Bandfläche, in die sehr zahlreiche, schmale Gruben eingesenkt sind, mit mehreren Untergattungen (†Edentula L. Waag. z. B.) lebt seit der Trias. An †Gervilleia schließt sich, in bezug auf die Bandfläche durch sehr zahlreiche, aber niedrige Gruben eine Parallelgruppe zu Perna bildend, die durch dicke Prismenschicht bei reduzierter Perlmutterlage gekennzeichnete, weitverbreitete Gattung †Inoceramus Sow. (Jura, Kreide) an, die besonders in der Oberen Kreide eine Menge sehr wichtiger Leitfossilien geliefert hat. In der jüngeren Kreide einzelner Gebiete (Salzburg, Nordafrika, Kansas) produziert †Inoceramus



Fig. 34. †Inoceramus Cripsi Mant. Obere Kreide; Gosau, Ostalpen. a Linke Klappe von außen, b von innen, Schloßrand mit vielen Bandgruben, nicht taxodonten Zähnen! $^1/_2$ natürliche Größe. Nach Zittel aus v. Stromer.

vor dem Erlöschen der Gattung mächtige Riesenformen, deren Länge und Höhe 50 cm überschreiten kann. Von Interesse ist bei †Inoceramus auch das Entstehen einer Parallelgruppe zu der Aviculiden-

gattung †Aucella: durch Verkürzung des Schloßrandes, starke Wölbung der linken Klappe, hakenförmige Krümung des linken Wirbels wird †Actinoceramus Meek

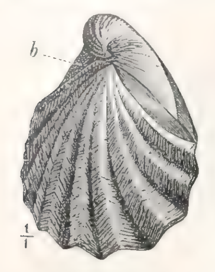


Fig. 35. †Actinoceramus sulcatus Park. sp. Gault, Untere Kreide; Perthe du Rhône, Frankreich. b Bandgruben der linken Klappe. Aus Steinmann.

(Kreide), eine Gruppe, die im Gegensatz zu der sonst vorherrschenden konzentrischen Faltung grobe Radialfalten trägt.

Im älteren Palaeozoicum zweigt von †Pterinea die Familie der Pinnidae ab. Verlagerung des Wirbels an das Vorderende des Schloßrandes, allmähliche Unterdrückung des vorderen Ohres, grenzloser Uebergang des hinteren Ohres in die Wölbung der Schale, Verlust der Zähne, Langstreckung des Schloßrandes führt über †Palaeopinna Hall (Devon, Nordamerika) zu den spitzwinklig dreiseitigen Formen von †Aviculopinna Meek (Karbon, Perm), schließlich zu Pinna L. (Trias bis jetzt), bei der das vordere Ohr ganz verschwunden ist und die hinten klaffende Schale fast nur aus der Prismenschicht besteht. Eigenartig ist bei Pinna die häufige Skulpturdifferenz zwischen der oberen und unteren Hälfte der Schale. Aus Pinna wird durch riesiges Dickenwachstum der Prismenschicht die meist großwüchsige Gattung †Trichites Plott. (Jura, Kreide), deren Muskeleindruck sich über den größten Teil der Schale hinzieht.

An †Pterinea schließt sich ferner im älteren Palaeozoicum die Familie der †Ambonychiidae an. In der gleichklappigen, hohen Schale ist der Wirbel ganz an das Vorderende gerückt, ein vorderes Ohr fehlt. Teils sind noch vordere kurze und lange hintere Leistenzähne vorhanden: †Byssonychia Ulr., †Megaptera Meek (Silur), †Gosseletia Barrois (Devon, konzentrischgestreift), teils fehlen sie: †Ambonychia Hall (Silur).

An die Aviculaceen ist vermutlich auch die eigenartige Familie der seit dem Jura lebenden Vulsellidae Stol. anzuschließen. Die an Austern erinnernden unregelmäßigen Formen, die wie zum Beispiel Vulsella Lam. zwischen Schwämmen bewegungslos leben, haben unter dem Wirbel eine große Bandgrube; der Haftmuskel liegt fast zentral; manche Formen klaffen hinten mehr oder weniger stark: †Eligmus Desl. (Mittlerer Jura), †Chalmasia Stol. (Kreide), Vulsella Lam. (Eocän bis jetzt), Malleus Lam. (Quartär).

Die Familie Limidae mit gleichklappigen, ungleichseitigen, nach vorn unten vorgezogenen Schalen, mit kurzem, geradem Schloßrand, mit kleinem vorderem, etwas größerem hinterem Ohr, ohne oder selten mit wenigen taxodonten Zähnen, mit dreiseitiger Ligamentgrube in der kurzen Bandfläche, mit großem subzentralem hinterem Muskeleindruck, mit Byssusspalt, manchmal hinten klaffend, teils durch einen Byssus angeheftet, teils frei schwimmend, ist vom Oberkarbon bis jetzt zu verfolgen, besonders häufig im Mesozoicum. Meist werden die Limidae als Abkömmlinge der Pectinidae aufgefaßt, z. B. von Jackson. Bei manchen Limidengruppen: †Mysi-

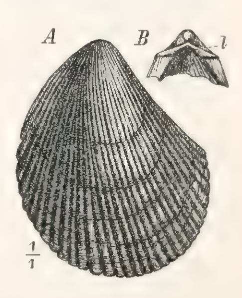


Fig. 36. Lima †striata Schl. Muschelkalk, Trias; Süddeutschland. A rechte, B linke Klappe, l dreieckige Bandgrube. Aus Steinmann.

dioptera Salom. (Karbon, Trias), Acesta Ad. (Kreide bis jetzt) läßt sich sowohl in der Form — ganz vorne liegender Wirbel, weil unterdrücktes vorderes Ohr, längeres hinteres Ohr — als auch in der Bandarea — schiefliegende Grube — naher Anklang an manche alten Aviculiden — †Limoptera — erkennen. Bei einer Triasform, †Aviculolima Jaekeli aus Rüdersdorf, konnte E. Philippi, abgesehen von der nach vorn unten gezogenen Schale, im Schloß Aviculidencharaktere erkennen. Die Limiden sind darum noch den Aviculaceen zuzurechnen. Schon im Jungpalaeozoicum wurden eine Anzahl besonderer Aeste produziert, so †Mysidioptera, deren Form in den jüngeren Acesta wiedergespiegelt wird, dann †Plagiostoma Sow. (Oberkarbon bis Alttertiär), oft großwüchsig (†Plagiostoma giganteum, Untere Lias), glatt oder radial gerippt, stark nach vorn gezogen, mit relativ großen Ohren und großer Lunula; Radula Klein (Kreide bis jetzt), kürzer, mit groben Radialrippen: †Limatulina de Kon. (Karbon, Perm), Limatula Wood (Mittlerer Jura bis jetzt), sehr wenig schief, mit groben Rippen nur auf dem Mittelteil der Schale; Mantellum Bolt. (Kreide bis jetzt), mit auffällig großem Byssusspalt, hinten klaffend. †Limea Bronn (Jura bis Tertiär) hat

auf der Schloßfläche der kleinwüchsigen Klappen schiefe Zähnchen neben der Bandgrube, eine Konvergenz zu Limopsis. Dickschalige, flüchtig an Austern erinnernde, grobskulpturierte, oft mit Hohlstacheln be-

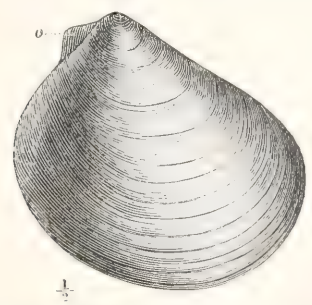


Fig. 37. †Plagiostoma giganteum Sow. sp. Unterster Jura (Lias α); Elsaß. Rechte Klappe, o hinteres Ohr. Aus Steinmann.

setzte, großwüchsige Formen — †Ctenostreon Eichw. — sind im Jura nicht selten.

†Myalinidae Frech. Eine Anzahl paläozoischer bis triadischer Gattungen: †Myalina de Kon. (Silur bis Trias), †Eurydesma Morr.,? = Leiomyalina Frech (Perm; Indien, Australien), † Myalinoptera Frech, † Mytilopsis Hall (Devon), †Libea Waag. (Karbon), † Pergamidia Bittn. (Trias) mit meist dickschaligen, schief vierseitigen bis gerundeten Klappen, mit weitvorgerücktem Wirbel und sehr verkümmertem vorderem Ohr, mit Byssusspalt zeigen im Schloß ein Band in langer, dem Rande paralleler und oft gestreifter Rinne. Das sind, und zwar zum Teil primitive, Aviculidencharaktere. Die Myaliniden haben aber zwei große Muskel-

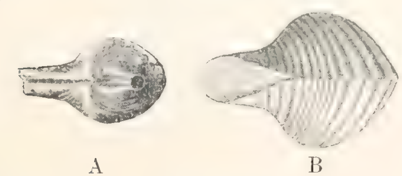


Fig. 38. A † Conocardium Nysti de Koninck. Unterkarbon; Tournay, Belgien. Von hinten und oben gesehen, mit erhaltenem Band auf der „Siphonal"röhre. Natürliche Größe. B †Conocardium aquisgranense Beushausen. Rheinisches Mitteldevon. Mit vorne unten klaffendem Schalenrand. Steinkern von unten. Natürliche Größe. Aus v. Stromer.

eindrücke, und Koken sagt von †Eurydesma, daß dort der vordere Muskeleindruck größer sei als der hintere. Die Beziehungen zu den Aviculaceen bedürfen noch genauerer Feststellung.

An die Aviculaceen ist wohl sicher ein Teil der Neumayrschen Palaeoconchen anzuschließen: die † Lunulicardiidae (Ober-Silur, Devon) und wohl auch die † Conocardiidae (Silur bis obere Trias). † Lunulicardium Münst., dünnschalige meist gleichklappig dreiseitige Muscheln mit spitzen Wirbeln, vorn mit deutlicher Lunula und weitem Byssusspalt hat J. M. Clarke jüngst genauer untersucht und meint die Lunulicardien an die Ambonychiden anschließen zu sollen. Sie wären dann (? reduzierte) Aviculiden. Die Conocardiiden (†Conocardium Bronn und ? †Conocardiopsis Beush., Devon), in der Form durch den langen, rohrartigen hinteren Flügel (Siphonalröhre) Aviculidencharaktere zeigend, mögen trotz der eigentümlich differenzierten Schale — Außenschicht zellig, prismatisch — an die Lunulicardien anzuschließen sein.

2. Pectinacea. Die meist mit Byssus versehenen, teils mit ihm oder direkt mit einer — der rechten — Klappe angewachsenen oder freien Schalen haben meistens geraden Schloßrand mit meist scharf abgesetztem vorderem und hinterem Ohr. Wenn Zähne ausgebildet sind, so strahlen sie vom Wirbel radial weg, sind vorn und hinten gleich, isodont. Das Band zieht meist über die ganze Schloßfläche, ein Teil ist in eine mediane, dreiseitige Grube eingesenkt, also teils äußerlich, teils innerlich. Der große hintere Muskeleindruck liegt subzentral. Silur bis jetzt.

Familien: Pectinidae, Spondylidae, Dimyidae, Anomiidae.

Pectinidae. Die ältesten, gewöhnlich den Pectiniden zugerechneten Formen, die artenreiche Gattung † Aviculopecten M' Coy (Silur bis Karbon) entbehrt in ihrem langgestreckten Schloßrande der medianen dreiseitigen Bandgrube. E. Philippi schloß sie darum von den Pectiniden aus. Doch dieses Fehlen der Grube kann nicht zu schwer wiegen, wenn man die Verlagerung in Betracht zieht, die das Ligament bei Nuculiden und Lediden erfahren hat. Sehr wahrscheinlich stellt Aviculopecten die Verbindung zwischen Aviculiden und Pectiniden dar, falls man nicht für die letzteren nach dem Vorkommen kleiner Reihenzähnchen bei † Crenipecten Hall, † Euchondria Meek (Karbon, Perm ?) eine besondere Wurzel in den Taxodonten annehmen wollte. Die Erscheinung des bleibenden Taxodontenzustandes bei den genannten Formen könnte auch wohl als atavistisch, vielleicht gar als eine Art von Neotenie gedeutet werden. An Taxodontie erinnert übrigens auch die dichte Kerbung des Schloßrandes bei den dickgewölbten Formen des Pecten (Spon-

dylopecten) †globosus Quenst. aus dem oberen Jura.

Echte Pecten Klein sind mindestens seit dem Karbon bekannt. Frühzeitig werden eine große Zahl divergenter Typen produziert; die Hauptblüte fällt ins Tertiär. Neben Formen mit großen, flachen, ungleichen Ohren — †Streblopteria M'Coy (Karbon bis Trias) — zeigt schon das jüngere Palaeozoicum eine Reihe besonderer Typen, so die gleichseitigen glatten Formen von Entolium Meek (Karbon bis jetzt) mit gleich großen Ohren, ohne Byssuseinschnitt. Durch Erwerbung innerer Radialrippen zweigt hiervon Amusium Klein (Tertiär bis jetzt) ab. Camptonectes Ag. mit langem, durch Byssusschlitz abgetrennten vorderen Ohr der rechten Klappe und mit feiner leicht gebogener Radialskulptur ist im unteren Perm (hier mit Skulptur à la guilloche) bekannt, dann vom Jura bis jetzt. Chlamys Bolten, mit fast gleichseitigen Klappen, mit größerem vorderem Ohr, mit kräftigen Radialrippen lebt seit dem Oberkarbon bis jetzt. Der heute artenreiche Aequipecten Fisch. mit gleichklappiger, sehr verschiedenartig skulpturierter Schale existiert seit der Trias; im unteren Jura zweigte davon das kleinwüchsige, durch innere Radialrippen ausgezeichnete †Variamusium Sacco ab (†Variamusium contrarium v. Buch, pumilum Lam.). In der Form der rechten Klappe durch das tief abgeschnürte vordere Ohr an †Pseudomonotis erinnernd tritt in der Trias die vielleicht von †Streblopteria abgezweigte Untergattung †Pleuronectites auf, und im Jura und der Kreide die Formen von †Velopecten Quenst. E. Phil. (Hinnites auct.) mit besonders großem, flachem, vorderem Ohr, mit abwechselnd groben und feinen Radialrippen, die von flachen konzentrischen Runzeln gekreuzt sein können. Besonders eigenartig ist das Auftreten der als Vola Klein (Janira Schum., Neithea Drouet) bezeichneten Formen mit sehr hochgewölbter rechter Klappe, während die linke flach bis konkav ist; im Lias Südamerikas, in der Kreide, dann vom Oligocän bis jetzt sind solche Formen bekannt. E. Philippi hob dieses unterbrochene Auftreten gleichartiger Formen als ein vorzügliches Beispiel „iterativer Artbildung" (Koken) hier am Stamme von Aequipecten hervor. Im Tertiär erscheint dann die wohl von Chlamys abgeleitete Gattung Hinnites Defr., deren Schalen in der Jugend mit einem Byssus, später meist mit der rechten Klappe festgewachsen sind.

Spondylidae. Vielleicht bereits im Karbon (†Pachypteria de Kon.) zweigen von Pecten die isodonten oder auch zahnlosen Spondyliden ab, deren Band in eine ± tiefe Grube als teils innerliches zwischen den Zähnen eingesenkt sein kann. In Perm und Trias treten flache, zahnlose, mit der rechten Klappe aufgewachsene Formen auf — †Prospondylus Zimm., †Enantostrion Bittn., †Philippiella L. Waag., welche mit †Terquemia Tate aus dem Lias früher meist für aberrant, rechts angewachsene Austern gehalten wurden. Sie werden jetzt als „zahnlose Spondyliden" bezeichnet, an die sich die Gattung Plicatula Lam. (Trias bis jetzt, Blüte in Jura und Kreide) anschließt, deren isodontes Schloß leistenförmige Zähne besitzt und deren Schale häufig durch konzentrische Blätter und hohle Stachelchen verziert ist. Die kräftig radial skulptierten, oft mit Stacheln besetzten Spondylus Lang, deren rechte

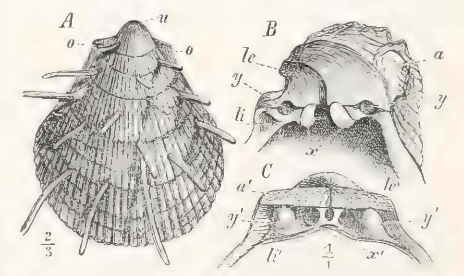


Fig. 39. A Spondylus †spinosus Sow. sp. Obere Kreide, Turon; Strehlen, Sachsen. A rechte Klappe von außen. B Schloß der rechten, C der linken Klappe von Spondylus †tenuispina Sandb. Mittel-Oligocän, Tertiär; Mainzer Becken. a, a′ Area; le, le′ äußere, li, li′ innere Bandgrube; o Ohren; x, x′, y, y′ entsprechende Zähne und Zahngruben. Aus Steinmann.

Schale — bei manchen mit sehr großer Fläche — festgeheftet ± kegelförmig werden kann, sind vereinzelt seit dem Jura bekannt, sie werden in der Kreide häufiger, blühen im Tertiär. An die Spondylidae sind nach O. M. Reis auch die in der Form lebhaft an Austern erinnernden †Lithiotis Gümb. und †Cochlearites O. M. R. aus dem Tertiär anzureihen. Auch †Chondrodonta Schuch. aus der Unteren Kreide findet wohl am besten bei den Spondyliden Platz.

Dimyidae. Die Stellung der einzigen Gattung Dimya Rouault = Dimyodon Mun. Chalm. (Trias bis jetzt) ist nicht genügend aufgeklärt. Sie kann vielleicht an die zahnlosen Spondyliden der Trias anknüpfen, hat aber einen großen vorderen und besonders großen hinteren, verdoppelten, Schließmuskel.

Anomiidae. Der Anschluß der ganz besonders spezialisierten Gattungen der Anomiiden an die Pectiniden ist nicht ganz sichergestellt. Die zahnlosen bis undeutlich

isodonten, dünnen, perlmutterreichen, ± kreisförmigen, flachen Schalen mit innerem Bande sind meist, wenigstens in der Jugend, durch einen die rechte Schale durchbohrenden Byssus angeheftet. Abgesehen von ganz fraglichen Formen im Devon (†Limnamonia Bouch.) kennen wir Anomiiden seit dem Jura: †Placunopsis Morr. a. Lyc., Placuna Brug., Ephippium Bolt. (Tertiär und lebend), Anomia L. (Jura bis jetzt), Carolia Cantr. (Alttertiär).

3. Ostracea. Die meist dickschaligen in der Jugend oder meistens dauernd mit der rechten, seltener linken Klappe festgewachsenen Austern, die typischsten „Monomyarier", sind von einzelnen, mehr oder weniger fraglichen paläozoischen Formen abgesehen, besonders seit dem Jura in meso- und känozoischen Flachseeablagerungen sehr häufig, im Lias, Dogger direkt fossile Austernbänke bildend. Die Gattung Ostrea L. selbst ist — in je nach dem Wohnsitz außerordentlich variierenden Formen — seit der Trias bekannt, ebenso die durch starke ± radiale Faltenrippen ausgezeichnete Alectryonia Fisch. die besonders in Jura und Kreide häufig ist. Seit dem Lias kennen wir Gryphaea Lam., wieder besonders häufig in Jura und Kreide; und dort einzelne Arten als sehr wichtige Leitfossilien bekannt: †arcuata im Unteren Lias, †cymbium im mittleren Lias, †dilatata im Callovien-Oxford, †vesicularis im Senon. Gryphaea mit oft sehr hoch gewölbter

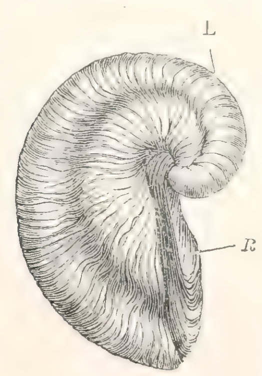


Fig. 40. † Gryphaea arcuata Lam. Unterer Jura, Lias α; Phoren bei Donaueschingen, Baden. L linke, R rechte Klappe. Aus Zittel.

linker Klappe, deren Wirbel über die flache rechte hinüber gebogen sein kann, zeigt bei den Ostreen eine Parallelform zu Pseudomonotis — Aucella bei den Aviculiden. †Exogyra Say mit seitlich eingedrehten Wirbeln, mit gebogener schmaler Bandgrube tritt im Oberen Jura (†Exogyra virgula) und in der Kreide (†Exogyra columba, flabellata) sehr häufig auf. Die Abstammung der Austern wird verschieden aufgefaßt: R. T. Jackson schloß sie an die Perniden, andere haben sie an Pectiniden

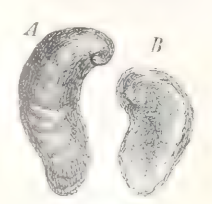


Fig. 41. † Exogyra virgula Defr. Oberer Jura, Kimmeridge; Berner Jura. A linke, B rechte Klappe. Aus Steinmann.

angereiht, H. Douvillé sieht in ihnen Abkömmlinge der Limiden, mit welchen die Bandregion am besten übereinstimmt.

4. Mytilacea. Seit dem Devon — Modiola Lam. — bis jetzt existiert eine Gruppe gleichklappiger, eiförmig bis drei- oder vierseitig umrissener Muscheln, ohne Prismenschicht, mit weit vorn liegendem, oft spitzem Wirbel, deren vorderes Ohr klein oder ganz verkümmert ist, mit zahnlosem Schloß (bei Crenella Bronn — Kreide bis jetzt — meist mit einer Reihe von Kerbzähnen hinter dem Wirbel), mit gestreckter Bandrinne hinter den Wirbeln, mit kräftigem Byssus, mit kräftigem vorderem Muskeleindruck. Ihre Beziehungen zu den übrigen Anisomyariern sind nicht genügend geklärt. Wenn sie auf Aviculaceen, etwa über Myaliniden, zurückzuführen sein sollten, so würde ihre bei den meisten herrschende Bilateralsymmetrie der Schalen sie als eine ganz besonders alte Abzweigung kennzeichnen.

Während Modiola (Devon bis jetzt) mit oft seitlich gedrehtem kleinem Wirbel noch ein breit gerundetes aber undeutlich abgesetztes vorderes Ohr besitzt, tritt dasselbe bei Septifer Recl. (Trias bis jetzt), Mytilus L. (Trias bis jetzt), †Pachymytilus Zitt. (Oberer Jura) allmählich ganz zurück, die Formen werden ± dreiseitig mit vielfach spitzem, sogar gebogenem Wirbel (vgl. den Artikel „Lamellibranchiata" S. 7 Fig. 1 Mytilus edulis). An Modiola schließt die Bohrmuschel Lithodomus Cuv. mit geblähten elliptischen Schalen ohne vorspringenden Wirbel an, deren Bohrröhren seit dem Karbon nicht selten gefunden werden. Ob die untersilurische (!) Bohrmuschel †Lithobia Kok. hier oder an die Modiolopsiden anzuschließen ist, bleibt ungewiß.

Von Mytilus dürften in der oberen Kreide die Dreissensiiden abzweigen, die z. T. wie die kleinwüchsige, wie Mytilus geformte Dreissensia van Ben. (Obere Kreide, vorwiegend Tertiär, rezent) in Brack- und Süßwasser wanderten. Die großwüchsig

werdende, dicke und dickschalige Congeria Partsch oft von subquadratischem Umriß ist besonders häufig in den jungtertiären, „Congerienschichten" Osteuropas. Durch das Vorkommen von Siphonen nehmen

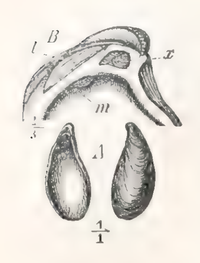


Fig. 42. Congeria †Brardi Fauj. sp. Tertiär, Unter-Miocän; Mainzer Becken. A Linke Klappe von innen und außen. B Congeria †subglobosa Partsch. Tertiär, Pliocän; Inzersdorf bei Wien. Schloß der linken Klappe. l Bandgrube, m Eindruck des Byssusmuskels, x vorderer Muskeleindruck. Aus Steinmann.

Dreissensia und die miocäne † Dreissensiomya Fuchs (diese außerdem mit Mantelbucht), ähnlich wie Leda und Yoldia bei den Taxodouton, eine besondere Stellung unter den Anisomyariern ein: sie sind besonders progressiv umgestaltet.

Die größte Blüte der Anisomyarier fällt ins Devon, neues Aufblühen findet im Mesozoicum statt. Am reichsten entfaltet waren die heute fast ganz zurücktretenden Aviculaceen. Pectinaceen und Ostraceen blühen besonders im Mesozoicum.

3. Geologische Bedeutung der fossilen Muscheln. Es muß für die Muscheln (ebenso wie für die übrigen Mollusken) als auffallend bezeichnet werden, daß das Kambrium mit seiner sonst vielartigen Fauna iher fast vollkommen entbehrt, obwohl in kambrischen Gesteinen dieselben vielen Faziesdifferenzierungen von strandnächsten bis weit strandfernen und tieferen Meeresbildungen erkennbar sind, die in späteren Formationen die Lebenswohnsitze der vorwiegendst marinen Muscheln bilden. Nur das allerjüngste Kambrium (Tremadoc und Quebecgroup) in Wales und Nordamerika zeigt in Seichtwasserbildungen eine wirkliche, aber noch durchaus ärmliche Muschelfauna: Taxodonten († Ctenodonta, † Glyptarca), primitive Heterodonten († Cyrtodonta, † Palaearca, ? † Davidia, † Modiolopsis). Reichere Entfaltung ist in den Meeren des Silur zu sehen: Taxodonten (Nuculacea, Marcodontiden), Heterodonten (Vorläufer der schizodonten Trigoniacea wie † Lyrodresma, der Astartacea — † Anodontopsis, † Modiolopsis, der Megalodontacea — † Megalomus), die Praecardiiden und Cardioconchen von den „Palaeoconchae", integri- und sinupalliate Desmodonten sowie von Anisomyariern die Aviculaceen († Pterinea, † Rhombopteria) und Pectinaceen († Aviculopecten). In der Silurzeit begegnet aber wieder Auffallendes: verhältnismäßig recht arm an Muscheln sind die strandnahen, terrigenen Ablagerungen. Nur selten, wie im armorikanischen Sandstein Frankreichs finden wir eine etwas reichere Fauna. Dagegen sind manche silurischen Kalke — strandfernere Ablagerungen wohl auch tieferen Meeres — auffallend reich an Muscheln, und hier ist besonders reich die Entfaltung der dünnschaligen „Palaeoconchae" mit indifferenter Schloßbildung (teils Heterodonta, teils Anisomyaria); konnte doch Barrande Hunderte von Arten solcher Formen aus Böhmen unterscheiden. Ebenso schwierig, wie die zeitlichen Zusammenhänge der einzelnen Muschelstämme zu fixieren, wird durch so gestaltete Ueberlieferung die Frage nach den Ursprungsgebieten der Muscheln: Weder Litoral noch Pelagial lassen sich bislang als sichere Urheimat der Muscheln erkennen.

Erst im Devon werden die Seichtwasser-Muschelfaunen reicher, wie namentlich im rheinischen Unterdevon, in dessen terrigenen Gesteinen besonders Aviculaceen, Mytilaceen, integripalliate Desmodonten, Nuculaceen, dann auch verschiedene Stämme integripalliater Heterodonten vertreten sind. Aber noch bleiben die strandfernen Cephalopodenkalke recht reich an verschiedenartigen dünnschaligen Palaeoconchen († Cardiola, † Buchiola u. a. m.), während an Riffen sich dickschalige Megalodonten (Eifel, Paffrath) ansiedeln. Zugleich treten im Devon (Rheinisches Schiefergebirge; New York) uns die ersten Süß- und Brackwasserformen entgegen: † Amnigenia, der älteste Vertreter der in Karbon-Perm-Trias eine wichtige Rolle spielenden † Anthracosiidae.

Seit karbonischer Zeit werden die Muschelfaunen mehr und mehr auf strandnahe Flachseebildungen und auf die Riffazies konzentriert, in denen eine reichere Differenzierung der Heterodonten, dann aber auch der Pinniden, Pectiniden, Limiden einsetzt. Strandfernere Bildungen teils wohl auch tieferen Meeres, vorwiegend Schiefer, doch auch Kalke, führen seither nur ärmlichere Faunen mit wenigen Arten, diese aber oft in ungeheuerer Individuenzahl: besonders Aviculaceen, die als Byssusträger vielleicht pseudoplanktonisch weit verfrachtet werden konnten z. B. † Pseudomonotis im Unterkarbon, in Trias und Lias, † Halobia, † Monotis in der Trias, † Aucella in Jura und Unterer Kreide.

Das Mesozoicum bringt besonders reiche Entfaltung einmal integripalliater Heterodonten (Trigoniacea, Astartacea, Cyprinaceae, Megalodontacea), dann sinupalliater Desmodonten (Pleuromyiden, Pholadomyiden, Panopaeiden) und mancher Anisomyarier (der Perniden, Pectiniden, Spondyliden, Limiden, besonders der Ostreiden). In dem Muschelreichtum des Mesozoicum sehen wir besonders oft und deutlich, wie unter dem

Einfluß differenter Fazies sich vielfältige Umprägung der Formen vollzieht. Vorzüglich ist das Beispiel der Megalodontacea: Von den riffbewohnenden † Megalodonten der Trias und † Diceraten des Jura mit beim Festwachsen gering vorschreitender Asymmetrie zu den vollkommenst asymmetrischen † Monopleuren und † Rudisten, die nicht mehr an Korallriffen, sondern meits in Gebieten schnellerer Sedimentanhäufung lebend ihre Klappen zu einer kegelförmigen Unter- und deckelförmigen Oberschale umgestalten. Und unter dem Einfluß der Sedimentationsart sehen wir bei den Ostreiden Formen werden, wie die auf weichem Sediment den linken Wirbel überkrümmende † Gryphaea, oder die unter dem Einfluß von Strömungen (?) um die Anwachsstelle sich herumkrümmende † Exogyra.

Das Ende des Mesozoi um wird für viele Muscheln ebenso wie für zahlreiche andere Tiergruppen eine kritische Zeit. Die † Capriniden, † Rudisten verschwinden, die Trigonien gehen auffallend zurück, bei den integripalliaten Heterodonten überhaupt ein starker Rückgang; die für Jura und Kreide so sehr charakteristischen † Inoceramen verschwinden und die große Menge der Aviculaceen, Pectinaceen, Ostraceen wird schnell reduziert. Dafür blühen sinupalliate Heterodonten auf, und die sinupalliaten Desmodonten beginnen in großer Zahl neue Formen zu differenzieren.

Seit Ende der Kreide, durch das Tertiär zum Jetzt herrschen sinupalliate Hetero- und Desmodonten vor. Mit dem Tertiär, mit vollkommenerer Ueberlieferung der Festlandsablagerungen gewinnen auch Brack- und Süßwasserformen wieder an Bedeutung, jetzt Najadiden, Cyrenaceen u. a. m.

So in den meisten Stämmen vielfache Umprägungen, während die Taxodonten fast alle Zeiten in gleichmäßig ruhigem Schritt durchmaßen.

Zahlreiche Gruppen lieferten gute „Leitfossilien“, doch häufig so, daß die einzelne Art mehr als leitend für einen größeren Schichtenkomplex gilt (z. B. † Posidonomya Becheri im Kulm, † Posidonomya Bronni, † Pseudomonotis substriata im Lias ε) als für eine engstgefaßte „Zone“. Manche Arten sind langlebig, darum nicht wohl als Masse für kurze Zeiten zu verwenden: Cucullaea † texta Roem. lebte vom mittleren weißen Jura bis in die untere Kreide. Mehrfach konnten Muscheln auch für paläogeographische Festlegungen günstigst verwendet werden, wie das die oben angeführten Beispiele der † Aucellen und † Rudisten zeigen, von denen jene die Konstruktion besonderer Wanderwege gestatten, während diese die Aufstellung eines bestimmten, tropischen oder wenigstens äquatorial gerichteten Gürtels ermöglichten. Manche bohrenden Muscheln, wie Pholadiden, begleiten und kennzeichnen Transgressionserscheinungen der Meere, wie im Hils die Transgression der unteren, im fränkischen Jura die der oberen Kreide über Jura.

Auch als Gesteinsbildnern kommt den Muscheln — teils aktiv, teils passiv — Bedeutung zu. Die Austern-, Gryphaeen-, Exogyrenbänke im Jura, die Capriniden- und Rudistenkalke in der Kreide zeigen, wie Muscheln an dem Aufbau von Kalken weitgehend mittätig sein können. Und häufig sind in verschiedenen Formationen „Lumachellen“ und „Muschelsande“, in denen mehr oder weniger abgerollte Muscheln und Muschelreste zusammengeschwemmt Material zum Gesteinsaufbau lieferten.

Literatur. *Vgl. die Zusammenstellung in* ***K. A. von Zittel,*** *Grundzüge der Paläontologie, I. Abt. Invertebrata, 3. Aufl. 1910.*

J. F. Pompeckj.

Landolt
Hans.

Geboren am 5. Dezember 1831 zu Zürich; gestorben zu Berlin am 15. März 1910. Er war ein Schüler Löwigs in Zürich, Privatdozent in Breslau (1856), Professor in Bonn (1858), in Aachen (1869), seit 1880 in Berlin. Seine ersten Untersuchungen galten den metallorganischen Verbindungen; später widmete er seine ganze Kraft physikalisch-chemischen Aufgaben, namentlich der Erforschung optischer Eigenschaften, wie Brechungs- und Drehungsvermögen organischer Stoffe. Seine zusammenfassenden Werke hierüber sind: Optisches Drehungsvermögen organischer Substanzen und Physikalisch-chemische Tabellen (mit Börnstein). In seinen letzten Lebensjahren bewies er durch peinlichste Versuche die Unanfechtbarkeit des Satzes von der Erhaltung des Stoffes (Berliner Akademie-Berichte).

E. von Meyer.

Längenmessung.

1. Allgemeines. 2. Längeneinheiten. 3. Maßstäbe. 4. Nonius. 5. Schraube. 6. Komparator. Kathetometer. Teilmaschine. 7. Bestimmung von Teilungsfehlern. 8. Einfache Vorrichtungen zur Messung von Endlängen (Kalibermaßen und Dicken): a) Fühlhebel, Meßkeil u. dgl. b) Nonius. c) Schraube. 9. Vergleichung von Endmaßen untereinander und mit Strichmaßen auf dem Komparator. 10. Endmaßesätze. 11. Längenmessungen mittels Lichtinterferenzen: a) Fizeausche Streifen. b) Haidingersche Ringe 12. Ophthalmometer.

1. Allgemeines. Durch eine Längenmessung wird die Frage beantwortet, wie oft eine als Längeneinheit gewählte Strecke in einer unbekannten Länge enthalten ist, oder mit anderen Worten, wie groß das Verhältnis der unbekannten Länge zur Längeneinheit ist. Dies Verhältnis wird im allgemeinen keine ganze Zahl sein.

Die Methoden der Längenmessung gestatten nicht, diese Verhältniszahl direkt zu finden; im Grunde genommen laufen alle Methoden vielmehr lediglich auf eine Vergleichung zweier sehr nahe gleicher Längen hinaus. Hieraus ergibt sich die Notwendigkeit nicht nur Verkörperungen der Längeneinheit selbst, sondern auch Abstufungen davon zu besitzen; diese Abstufungen, die nach einheitlichen Gesichtspunkten — im modernen Maß nach dem Dezimalsystem — angelegt werden müssen, sind bis zu so kleinen Intervallen herzustellen, daß Bruchteile davon zum Zwecke der Vergleichung mit der unbekannten Länge je nach der verlangten Meßgenauigkeit entweder direkt geschätzt oder mit den Hilfsmitteln, die bei Längenmessungen im Gebrauch sind, ausgewertet werden können.

2. Längeneinheiten. Als Längeneinheit kann von vornherein eine beliebige Strecke festgesetzt werden. Von alters her sind hierfür Größen in Benutzung, die den Längen des menschlichen Körpers entlehnt waren — Fuß, Schritt, Spanne — und welche demzufolge bei den geringen Ansprüchen, die man in frühester Zeit an die Genauigkeit der Längenmessungen stellte, jederzeit leicht reproduziert werden konnten. Insbesondere das Fußmaß hat sich bis in die neueste Zeit als Längeneinheit erhalten und ist auch heute in England und seinen Kolonieen noch nicht dem Meter gewichen.

Um die Mitte des 19. Jahrhunderts herrschte das Fußmaß außer in Frankreich noch unbeschränkt; wie weit aber trotzdem die Längeneinheiten der einzelnen Länder auseinandergingen, möge die folgende Tabelle zeigen, die die Werte der verschiedenen Fußmaße in Metern und ihre Einteilung wiedergibt.

	1 Fuß ist gleich m	Einteilung	
		in Zoll	zu je Linien
Baden	0,3	10	10
Bayern	0,2919	12	12
Preußen	0,3139	12	12
Sachsen	0,2832	12	12
Württemberg	0,2865	10	10
England	0,3047	12	10
Oesterreich	0 3161	12	12
Schweden	0,2969	10	10

Es hat nicht an Vorschlägen einzelner weitblickender Männer gefehlt, diese Zersplitterung des Maßwesens im Interesse eines gedeihlichen Handels und Wandels auch über die Grenzen des Landes hinaus durch internationale Vereinbarung zu beseitigen. Der wichtigste ältere Vorschlag in dieser Richtung war wohl der von Huyghens, der die Länge des einfachen Sekundenpendels, weil mit der Zeit unveränderlich und stets experimentell reproduzierbar, einem neu zu schaffenden Maßsystem zugrunde legen wollte. Nachdem sich jedoch aus Versuchen von Richer in Cayenne ergeben hatte, daß die Länge des Sekundenpendels auf der Erdoberfläche nicht konstant sei, sondern sich mit der geographischen Breite ändere, glaubte die zur Prüfung des Projektes von der französischen Regierung i. J. 1790 eingesetzte Kommission den Vorschlag Huyghens' ablehnen zu sollen. Dagegen schlug sie ihrerseits vor, ein neues Längenmaß direkt von den Dimensionen der Erdoberfläche abzuleiten, indem sie den 10 000 000. Teil des vom Pol zum Aequator gemessenen Erdquadranten als neue Längeneinheit unter dem Namen des Meters bestimmte.

Gemäß einem weiteren Vorschlage der Kommission fand in den folgenden Jahren eine Gradmessung zwischen Dünkirchen und Barcelona statt, deren Endergebnis war, daß die Länge des Meters zu 443,296 Linien der Toise de Pérou, des damaligen französischen Normalmaßes, bestimmt und gesetzlich festgesetzt wurde. Verkörpert wurde die neue Längeneinheit durch einen Endmaßstab aus Platin, der im Conservatoire des arts et métiers in Paris aufbewahrt wurde und der später unter dem Namen des „mètre des Archives" das Urmaß für alle Meterstäbe geworden ist.

Es liegt in der Natur der Sache, daß die Verfeinerung der geodätischen Messungen zu späteren Zeiten und an anderen Orten zu einer etwas anderen Größe der aus dem Erdquadranten hergeleiteten Längeneinheit geführt hätte. Um so überraschender ist es, daß die damalige Gradmessung Dünkirchen-Barcelona einen bis auf weniger als $^1/_{10\,000}$ mit dem Definitionswert übereinstimmenden Wert des Meters ergeben hat. Die Länge des Erdquadranten ist nämlich nach den besten neuesten Messungen zu 10 000 856 m anzunehmen. Auf Grund dieser Zahl die Längeneinheit zu ändern, würde unzweckmäßig sein, da es weniger darauf ankommt, daß die Längeneinheit gerade ein durch eine Potenz von 10 ausgedrückter Teil des Erdquadranten ist, als vielmehr darauf, daß die Einheit im Interesse der Kontinuität ein für allemal festgelegt ist. Außerdem ist naturgemäß auch die obige Zahl für die Länge des Erdquadranten noch mit Fehlern behaftet, deren Größe erst durch immer wieder neue geodätische Messungen eingeengt werden kann.

Das Meter wurde als Längeneinheit in Frankreich i. J. 1837, im Norddeutschen Bunde i. J. 1868 gesetzlich eingeführt. Da

eine weitere Verbreitung des metrischen Maßsystems dadurch stark beeinträchtigt wurde, daß die Schaffung von nationalen Urmaßen in jedem Falle von der Mitarbeit Frankreichs abhängig war, so beschloß die i. J. 1867 in Berlin tagende geodätische Konferenz für eine Gradmessung in Mitteleuropa, die Schaffung eines neuen europäischen Meterprototyps zu empfehlen. Die Länge dieses Meters sollte möglichst wenig von dem mètre des Archives abweichen und mit diesem aufs Genaueste verglichen werden. Die Herstellung des neuen Urmaßes, die Schaffung und Vergleichung von Kopien für die einzelnen Länder sollte einer internationalen Kommission anvertraut werden, in der die interessierten Staaten vertreten wären. Aber erst am 20. Mai 1875 wurde die Convention diplomatique du Mètre von den Vertretern von 18 Staaten unterzeichnet. Gemäß diesem Vertrage wurde auf gemeinsame Kosten ein wissenschaftliches Institut unter dem Namen Bureau international des Poids et Mesures mit dem Sitze in Paris gegründet, das alle auf Herstellung eines internationalen Maßsystems bezüglichen Fragen studieren sollte. Das Bureau sollte ferner internationale und nationale Meterprototype herstellen, untereinander vergleichen und an die vertragschließenden Staaten verteilen. Die Aufsicht über das Bureau wurde dem Comité international des Poids et Mesures übertragen, dem Vertreter aller vertragschließenden Staaten angehörten.

Die dem Bureau international des Poids et Mesures gestellten Aufgaben sind inzwischen im wesentlichen gelöst. Als Material für die herzustellenden Urmaße wählte man eine harte, widerstandsfähige Legierung von Platin mit 10% Iridium. Die Meterstäbe wurden aus Gründen der Festigkeit nach einem sogenannten X-förmigen Querschnitt (Fig. 1) gebaut. Das ganze Profil ist in einem Quadrat von 20 mm Seitenlänge enthalten; das Metall hat meist eine Stärke von 3 mm, nur der Unterbau ist etwas geschwächt, um den Querschnittsschwerpunkt in die Ebene der Teilung zu bringen, die genau in halber Höhe AB des Maßstabes liegt. Die Ebene der Teilung fällt auf diese Weise mit der sogenannten neutralen Fläche zusammen, wodurch die größtmögliche Unabhängigkeit des Strichabstandes von dem Einfluß etwaiger Durchbiegungen bewirkt ist. Die Einheit der Länge ist jetzt verkörpert durch den Abstand zweier Striche auf einem auf der Temperatur 0° befindlichen Maßstabe aus Platinsiridium, der im Bureau international de Poids et Mesures aufbewahrt wird. Die nationalen Meterprototype sind mit diesem internationalen Prototyp bis auf 1 bis 2 Zehntausendstel des Millimeters verglichen. Zur Sicherung des gesamten internationalen Maßwesens sind regelmäßig wiederkehrende Kontrollvergleichungen aller Prototype vorgesehen.

Das dem Deutschen Reich durchs Los zugefallene Meterprototyp ist der Kaiserlichen Normal- Eichungskommission in Berlin (Charlottenburg) überwiesen, die die

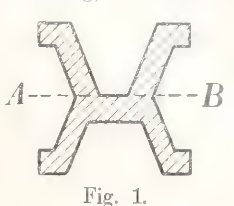


Fig. 1.

Oberaufsicht über das gesamte Eichwesen im Deutschen Reiche (mit Ausnahme von Bayern) ausübt. Das Eichwesen selbst ist in der Regel Sache der Gemeinden (Städte); die einzelnen Eichämter unterstehen Eichungsinspektionen.

Je nach dem Zwecke, dem die Meteretalons dienen sollen, sind für die Eichung verschiedene Fehlergrenzen zugelassen. Das ist nötig, denn an ein Längenmaß, nach dem etwa Kleiderstoffe zum Verkauf abgemessen werden sollen, werden erheblich geringere Anforderungen bezüglich der Genauigkeit gestellt, als an Kaliberkörper, nach denen Maschinenteile gearbeitet werden.

Sehr genaue Längenmessungen erfordern auch vorzügliche Hilfsmittel, die dem Eichamte und den Eichungsinspektionen nicht zur Verfügung stehen. Es ist manchmal bemängelt worden, daß die Zentralstellen des Eichungswesens diese Hilfsmittel über Gebühr ausgebildet hätten und Genauigkeiten der Messung anstrebten, an denen das praktische Leben kein Interesse mehr habe. Dem ist entgegenzuhalten, daß die Zentralstellen auch höheren Anforderungen zu genügen haben, indem sie beispielsweise geodätische Meßwerkzeuge mit weitergehender Präzision zu beglaubigen haben, als es Handel und Wandel je verlangt, ferner aber auch, daß sie die Aufgabe haben, einer Degenerierung des Maßwesens überhaupt vorzubeugen. Das kann aber nur dadurch geschehen, daß man an einer Zentralstelle wirklich das Vollkommenste zu erreichen sucht und Längenvergleichungen mit der größtmöglichen Genauigkeit ausführt.

Eben diesem Bemühen nach höchster Vollkommenheit der Meßgrundlagen ist es zu danken, daß man sich auch nicht dabei beruhigt hat, die einmal geschaffenen Meterprototype aus Platiniridium jetzt und für alle Zeiten als unveränderlich anzusehen. Man hat vielmehr geglaubt, das Fundament des Maßsystems noch dadurch sicherstellen zu müssen, daß man es zu anderen Längen, die man mit gutem Grund als unveränderlich ansieht, in Beziehung setzte. In solchem

Sinne unveränderlich sind die Wellenlängen der Aetherschwingungen, die man als das Wesen des Lichtes ansieht. Diese Wellenlängen sind zwar von einer ganz anderen Größenordnung als die Länge des Meters — in einem Meter sind mehr als eine Million solcher Wellenlängen enthalten — immerhin ist es aber mit den Mitteln der Interferenz, von der später (Abschnitt 11) noch die Rede sein wird, gelungen, diese kleinen Wellenlängen mit großer Schärfe zu messen (vgl. den Artikel „Interferenz des Lichtes").

Bezeichnet man die Wellenlänge der roten Spektrallinie, die das Cadmium aussendet, in trockener atmosphärischer Luft von 15° der Wasserstoffskala und 760 mm Druck, mit λ rot, so ist die Länge des Meters
nach Michelson . . . . . 1m = 1553164,03 λ rot
nach Benoit, Fabry u. Perot 1m = 1553164,13 λ rot.

Die Uebereinstimmung dieser beiden voneinander völlig unabhängigen Messungen ist bemerkenswert. Auf Grund dieser Resultate würde es möglich sein, die Einheit des Meters, wenn zufällig alle Etalons auf der ganzen Erde vernichtet werden sollten, mit einer Genauigkeit wiederherzustellen, die den besten Komparatormessungen (s. Abschnitt 6) vergleichbar wäre.

Das Meter (m) wird für Zwecke der praktischen Verwendung eingeteilt in 10 Dezimeter (dm), 100 Zentimeter (cm), 1000 Millimeter (mm). An einer kleineren Einheit als das Millimeter haben nur noch wenige Menschen ein Interesse. Für Zwecke der Feinmechanik, insbesondere aber für Arbeiten, die Längenmessungen und Längenvergleichungen zum Selbstzweck haben, gebraucht man noch die kleinere Einheit des Mikron (μ), wobei 1 μ = 0,001 mm = 0,000 001 m gesetzt wird. Die größte Genauigkeit, die unter günstigen Bedingungen bei Längenvergleichungen erzielt wird, beträgt wenig mehr als 0,1 μ.

Von Vielfachen des Meters ist die am meisten gebrauchte Einheit das Kilometer (km) = 1000 m. Das Myriameter = 10 000 m erfreut sich keiner Beliebtheit, wohl im Hinblick darauf, daß eine seit langem gebrauchte Längeneinheit die geographische Meile, die als der 5400. Teil des Aequators, gemessen in der Meeresfläche, oder als der 15. Teil eines Aequatorealgrades definiert ist, gleich 7422 m gesetzt, vielfach aber auch rund zu 7500 m gerechnet wird. Der Definition nach $^1/_{60}$ Aequatorealgrad, also der 4. Teil der geographischen Meile ist die viel benutzte Seemeile auch „Knoten" genannt, deren Länge zu 1852 m angenommen ist.

Für astronomische Zwecke sind die Längeneinheiten Kilometer und Myriameter viel zu klein. Man machte bei der Schaffung eines geeigneten Maßes von der Tatsache Gebrauch, daß der Lichtstrahl in 1 sec 300 000 km zurücklegt und bezeichnet demnach den Weg von 300 000 km als eine Lichtsekunde. Höhere Einheiten wären dann die Lichtminute, Lichtstunde, der Lichttag und endlich das Lichtjahr. Ein Lichtjahr enthält 9,5 Billionen km = $9{,}5 . 10^{12}$ km. Die Entfernung des nach der Sonne uns nächsten Fixsternes, eines Sternes im Centauren, beträgt mehr als 3 Lichtjahre.

3. **Maßstäbe.** Die Verkörperungen der Längeneinheit, ihrer Vielfachen und ihrer Teile nennt man Maßstäbe. Man unterscheidet Strichmaßstäbe und Endmaßstäbe. Bei diesen wird die verkörperte Länge durch den Abstand der beiden senkrecht zur Achse des Maßstabes gelegenen Endflächen definiert. Die Endflächen sind vielfach eben und einander parallel, häufig aber auch Teile von Kugelflächen, derart, daß der Radius der Kugel gleich der halben Länge des Maßstabes, die Maßstablänge also gewissermaßen ein Durchmesser der Kugel ist. Ein solcher Maßstab würde also auch die zu verkörpernde Länge ergeben, wenn er etwas aus seiner Achse herausgedreht wäre.

Auf den Strichmaßstäben ist die darzustellende Länge durch den Abstand zweier auf dem Maßstab gezogener, einander paralleler Striche definiert. Die Genauigkeit, mit der die Länge fixiert ist, ist durch die Schärfe und Feinheit der Striche bedingt. Auf den besten Maßstäben sind die Striche, die immer nur durch ein Mikroskop anvisiert werden, mit dem bloßen Auge häufig überhaupt nicht mehr wahrzunehmen.

Zwischen den End- und Strichmaßstäben besteht ein ganz fundamentaler Unterschied insofern, als die Endmaßstäbe immer nur eine bestimmte Länge repräsentieren, während ein Strichmaßstab die Darstellung beliebig vieler Längen auf sich vereinigen kann. Befolgen diese verschiedenen Längen eine gewisse Regelmäßigkeit, enthält der Maßstab z. B. eine größere Anzahl von Strichen im gleichen Abstande, so daß man von dem Maßstabe nicht nur ein Längenintervall, sondern auch vielfache desselben abgreifen kann, so nennt man die Gesamtheit aller Striche eine Teilung. Auf Maßstäben schreitet die Teilung meist nach Zentimetern oder Millimetern fort; feinere Teilungen, wie sie zu metronomischen Zwecken gebraucht werden, enthalten auch wohl Zehntelmillimeter. Noch engere Teilungen findet man in Mikroskopokularen, die engsten auf den sogenannten Gittern, die in der Optik zur Erzeugung von Beugungsspektren dienen; die von Rowland hergestellten Gitter enthalten bis zu 2000 Striche auf 1 mm.

Die Strichmaßstäbe mit Teilung bieten somit eine viel größere Verwendungsmöglichkeit als die Endmaßstäbe. Während diese vielfach in der Technik, z. B. als Kaliberkörper im Maschinenbau, im Gebrauch sind und überall dort gern benutzt werden, wo eine einzige, ganz bestimmte

Länge oft reproduziert werden soll, tritt der Strichmaßstab dann in seine Rechte, wenn es sich darum handelt, eine noch unbekannte Länge zu bestimmen, d. h. sie in metrischem Maße auszudrücken.

Als Material für Maßstäbe werden solche Metalle benutzt, die hohen Anforderungen an Härte und Unveränderlichkeit genügen. Dies trifft für das Platiniridium der internationalen und nationalen Prototype zu, von denen schon oben die Rede war (s. Abschnitt 2). Von billigeren Materialien werden Messing und Bronze, wohl auch — namentlich für Kaliberkörper — Stahl benutzt. Eine ausgedehnte Verwendung finden neuerdings insbesondere bei geodätischen Messungen, die unter dem Namen Nickelstahl bekannten Legierungen von Nickel und Eisen. In speziellen Fällen, bei kurzen Teilungen und bei Kaliberkörpern, deren Durchsichtigkeit gefordert wird (planparallele Platten), benutzt man Glas.

Alle aus solchen Materialien hergestellten Maßstäbe ändern ihre Länge mit der Temperatur und zwar entspricht einer Temperaturzunahme im allgemeinen auch eine Längenzunahme. Die Längenänderung beträgt für jeden Grad Temperaturänderung pro 1 m bei Messing 18 bis 19 μ, Stahl 11 μ, Platiniridium 8,8 μ, Jenaer Glas 16^{III} 8 μ, Jenaer Glas 59^{III} 6 μ, Invar (Nickelstahl mit 64 % Eisen und 36 % Nickel) 2 μ, Quarzglas 0,5 μ. Hieraus folgt, daß ein Maßstab, der bei einer bestimmten Temperatur gerade 1 m lang sein würde, bei anderer Temperatur diese Länge nicht mehr hat. Will man also etwas über die Länge eines Maßstabes aussagen, so muß man gleichzeitig hinsichtlich der Temperatur genaue Festsetzungen machen. Nach internationaler Vereinbarung gilt als Normaltemperatur für die internationalen und nationalen Prototype die Temperatur des schmelzenden Eises, 0°, d. h. bei dieser Temperatur sollen die Maßstäbe richtig sein. Bei jeder anderen Temperatur muß die Länge des Maßstabes berechnet werden. Zur Charakterisierung irgendeines Maßstabes genügt es also nicht anzugeben, wieviel er bei der Normaltemperatur 0° von seinem Nominalwert abweicht, sondern man muß auch noch das Gesetz der Ausdehnung hinzufügen. Alles zusammen wird durch die „Gleichung des Maßstabes" ausgedrückt. So ist beispielsweise die Gleichung der dem Deutschen Reich durch das Los zugefallenen Kopie des internationalen Prototyps aus Platiniridium

$$\text{Nr. } 18 = 1\,\text{m} - 1{,}0\,\mu + [8{,}642 \cdot t + 0{,}001 \cdot t^2]\,\mu.$$

Hierin bedeutet t die Temperatur in Celsiusgraden; für $t = 0$ also für die Normaltemperatur ist Nr. 18 = 1 m — 1,0 μ, d. h. die Kopie Nr. 18 ist um 1,0 μ kürzer als der Sollwert angibt.

Schon die Kopie Nr. 18 bietet ein Beispiel dafür, daß es nicht immer gelingt, Strichmaßstäbe völlig genau ihrem Sollwert entsprechend herzustellen, und was für diese, überhaupt allgemein für Teilungen gilt, gilt auch für Endmaßstäbe oder Kaliberkörper. Die Abweichungen sind in der Regel nicht auf Nachlässigkeit bei der Anfertigung der Meßwerkzeuge zurückzuführen, sondern sind in der Unvollkommenheit der technischen Herstellungsweise zu suchen, die mit der möglichen Meßgenauigkeit nicht gleichen Schritt zu halten vermag. Will man also mit einem Maßstab Messungen ausführen, so muß man zunächst ermitteln, wie weit der Maßstab selbst richtig ist. Die gewöhnliche Eichung begnügt sich damit, festzustellen, daß der Maßstab innerhalb gewisser Grenzen, die durch die Eichordnung genau bestimmt sind, richtig ist. Soweit genauere Messungen in Frage kommen, kann man hierbei nicht stehen bleiben; man ermittelt dann die Fehler des Normalmaßstabes und setzt diese bei Messungen, die man mit dem Normalmaßstab anstellt, in Rechnung.

Ein Endmaßstab kann nur e i n e n Fehler, den seiner Gesamtlänge besitzen. Ein Strichmaßstab kann außerdem eine fehlerhafte Teilung tragen. Man hat also bei Untersuchung eines Maßstabes einerseits die Gesamtlänge mit einem bekannten Maßstab zu vergleichen, andererseits muß man bei einem Strichmaßstab, der eine Teilung trägt, auch noch die einzelnen Intervalle als Teile der ganzen Länge bestimmen. Die entsprechende Aufgabe bei einem Endmaßstab besteht darin, Kaliberkörper, die aliquote Teile der ganzen Länge eines Endmaßstabes sind, ihrerseits auf den Endmaßstab und damit auf absolutes Maß zurückführen. Außerdem ist noch die Aufgabe zu lösen, einen Strichmaßstab und einen Endmaßstab von gleichem Sollwert miteinander zu vergleichen. Welche Wege einzuschlagen sind, und welche Apparate dazu benutzt werden, soll im folgenden kurz beschrieben werden. Vorher sollen noch zwei Hilfsmittel für die Ausmessung von Körpern, der Nonius und die Schraube, besprochen werden, von denen namentlich diese eine große Bedeutung und vielseitige Verwendbarkeit besitzt.

4. Nonius (V e r n i e r). Der Nonius hat den Zweck, die Schätzung eines Bruchteiles eines Strichintervalles zu erleichtern. Es soll beispielsweise ermittelt werden, welche Lage der in Figur 2 mit 0 bezeichnete Indexstrich gegen eine links gelegene Teilung hat. Zu diesem Zwecke besteht der gegen die Teilung verschiebbare Index nicht aus einem einfachen Striche, sondern bildet selbst den Anfang einer Teilung, die aber so einge-

richtet ist, daß ein Intervall derselben gleich $^9/_{10}$ Intervallen der Hauptteilung ist. Die Teilstriche beider Skalen erscheinen demzufolge systematisch gegen einander versetzt und es wird jedesmal eine Stelle geben, an der ein Teilstrich der einen Skala mit einem Teilstrich der anderen nahe zusammenfällt. In der Figur 2 ist dies der Teilstrich 83 der Haupt- und 7 der Nebenskala. Man sieht dann ohne weiteres, daß 6 bei 82,1, 5 bei 81,2 usw., endlich der Indexstrich 0 bei 76,7 liegt. Es ergibt sich also für die Messung die praktische Regel, daß der Indexstrich 0 um ebensoviel Zehntelintervalle oberhalb des nächsttieferen Intervallstriches der Hauptskale liegt, als der Strich der Nebenskale benannt ist, der mit einem Striche der Hauptskale zusammenfällt. Der Nonius findet vielfach Anwendung, wie z. B. bei Schublehren (Fig. 8), bei Quecksilberbarometern, auch bei Winkelmessungen als Kreisnonius. Oft kann es zweckmäßig sein, die Intervalle der Nebenskale nicht gleich $^9/_{10}$, sondern gleich $^{11}/_{10}$ der Hauptskale zu wählen; auch Noniusteilungen von 99 oder 101 Intervallen auf 100 Teile der Hauptskale sind im Gebrauch.

Fig. 2.

5. Schraube. Während der Nonius Intervallbruchteile nur diskontinuierlich, im Beispiel des vorigen Paragraphen nur von 0,1 zu 0,1, zu messen gestattet, arbeitet die Schraube kontinuierlich. Man denke sich den Indexstrich 0 der Figur 2 auf einer Schraubenmutter angebracht, die durch eine eingreifende Schraube bewegt wird. Es ist einleuchtend, daß, wenn man die Schraube einmal ganz herumgedreht hat, sich der Indexstrich 0 um einen Betrag voranbewegt hat, der gleich der Höhe eines Schraubenganges ist. Dreht man die Schraube nicht ganz herum, so rückt auch der Indexstrich nur um einen entsprechenden Bruchteil weiter, der sich aus dem Drehungswinkel berechnen lassen würde. Bequemer als den Winkel zu messen, ist es, den Kopf der Schraube als flachen Zylinder zu gestalten (vgl. z. B. Fig.3) und diesen mit einer Teilung, etwa in 100 Teile zu versehen. Eine Drehung der Schraube um ein Teilintervall entspricht dann einer Verschiebung des Indexstriches um $^1/_{100}$ des Schraubenganges, z. B. wenn die Ganghöhe der Schraube 1 mm beträgt, einer Verschiebung um 0,01 mm.

Wie die Schraube als Meßvorrichtung zu benutzen ist, wird im folgenden noch mehrfach Gelegenheit sein zu zeigen. Hier möge nur noch eine Vorrichtung besprochen werden, die bei Längenmessungen eine große Rolle spielt. Es war schon oben hervorgehoben, daß feine Teilungen mit bloßem Auge kaum sichtbar sind; um sie anzuvisieren, verwendet man darum fast immer das Mikroskop, das den Vorteil bietet, daß es zugleich die Visierrichtung eindeutig festlegt. Will man einen Strich mit Hilfe des Mikroskopes fixieren, so hat man nur nötig, im Okular des Mikroskopes in der Bildebene eine Marke anzubringen und das Strichbild mit dieser zur Deckung zu bringen. Solche Marken können entweder Striche sein, die auf einer in der Bildebene angebrachten Glasplatte eingeätzt sind, oder aber es werden in der Bildebene Coconfäden frei ausgespannt, zwischen deren zwei man den anzuvisierenden Strich in die Mitte bringt. Um nun Strichbild und Marke oder Fadenpaar gegeneinander verschieben zu können, wird entweder das ganze Mikroskop auf einen Schlitten montiert, der von einer Schraube bewegt wird, oder man macht bei feststehendem Mikroskop die Marke in der Bildebene beweglich.

Wie das geschehen kann, zeigt Figur 3, die ein solches Okular-Schraubenmikrometer der

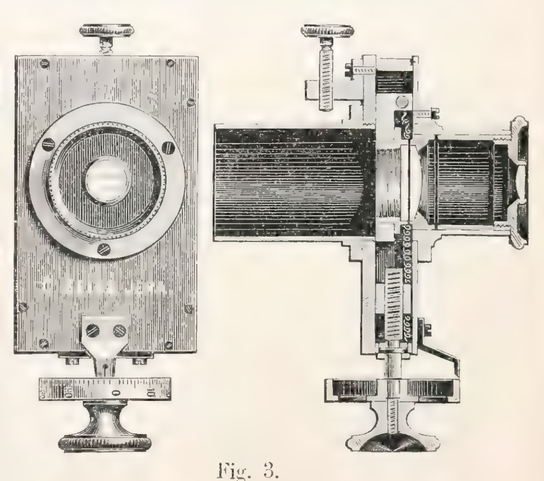


Fig. 3.

Firma Carl Zeiß in Jena von oben gesehen und im Durchschnitt in $^2/_3$ natürlicher Größe darstellt. Die Lage der das Strichbild überdeckenden Marke oder des Fadenpaares wird an der Teilung des Schraubenkopfes, auch Schraubentrommel genannt, abgelesen, die sich vor einem Index vorbeibewegt.

Während die Schraube in ihren sonstigen Verwendungsarten ein absolutes Meßinstrument ist, für das man nur die Höhe des Schraubenganges zu kennen braucht, ist das Gleiche für das Okular-Schraubenmikrometer nicht mehr der Fall; der Wert eines Schraubenumganges hängt hier vielmehr von der gewählten Vergrößerung des

Mikroskopes ab. Man bestimmt diese, indem man auf zwei ein bekanntes Intervall begrenzende Striche pointiert; ein auszumessendes unbekanntes Intervall steht dann zum bekannten Intervall im Verhältnis der entsprechenden Trommelintervalle.

Wie ein gewöhnlicher Strichmaßstab, so hat auch eine Schraube gewisse Fehler, die bestimmt werden müssen, wenn man sie als Meßschraube verwenden will. Den unregelmäßig verlaufenden Teilungsfehlern des Maßstabes entsprechen bei der Schraube Fehler, die man isolieren kann, wenn man die Schraube jedesmal um eine ganze Umdrehung bis zum Einstehen eines Trommelstriches in seiner früheren Lage dreht; die hierdurch gegebenen Längen sind dann nicht genau einander gleich. Man nennt ihre Fehler f o r t s c h r e i t e n d e Schraubenfehler und ermittelt sie in der gleichen Weise, wie man die Teilungsfehler eines Maßstabes bestimmt. Hierüber lagern sich Fehler, die allein der Schraube als kontinuierlichem Meßmittel eigentümlich sind und die daher rühren, daß die einzelnen Schraubengänge meist nicht ganz regelmäßig gestaltet sind, daß also die abgewickelte Schraubenlinie keine gerade, sondern eine gewellte Linie ist. Zufolge der Herstellungsart der Schrauben kehren diese Fehler indessen nahezu in jedem Schraubengang wieder und lassen sich daher als periodische Funktionen (sin und cos) des Drehungswinkels der Schraube darstellen. Man bezeichnet sie deshalb auch als p e r i o d i s c h e Schraubenfehler. Sie werden bestimmt, indem man wiederum die Schraubenintervalle mit Maßstabintervallen vergleicht; doch kann im einzelnen auf die praktische Lösung dieser Aufgabe hier nicht eingegangen werden.

Die periodischen Fehler der Schrauben sind dank den vorzüglichen Leistungen der Präzisionsmechanik sehr klein und können, abgesehen von den Messungen ersten Ranges, in der Regel vernachlässigt werden. Die fortschreitenden Fehler können bei längeren Schrauben recht erhebliche Beträge annehmen.

Außer den fortschreitenden und periodischen Fehlern ist bei Schraubenmessungen noch ein dritter Fehler, der t o t e G a n g , zu berücksichtigen. Er rührt daher, daß Schraube und Mutter nicht scharf aufeinander passen dürfen, sondern zwischen beiden etwas Luft bleiben muß. So kommt es, daß die Schraube, wenn man sie rückwärts dreht, zunächst eine kleine Strecke leer läuft und erst dann die Mutter mitnimmt. Die Größe des toten Ganges ist über eine längere Schraube hin variabel, weil die Schraube nicht überall genau dieselbe Dicke hat; sie ändert sich aber auch mit der Zähigkeit der zwischen Schraube und Mutter festgehaltenen Oelschicht. Man eliminiert den toten Gang, wenn man sich daran gewöhnt, bei Annäherung an einen einzustellenden Strich die Schraube immer im gleichen Sinne zu drehen. Bei Okular-Schraubenmikrometern ist diese Vorsicht meist nicht nötig, da Schraube und Mutter durch Spiralfedern (Fig. 3) stets von derselben Seite aufeinander gedrückt werden.

6. Komparator. Kathetometer. Teilmaschine. Diese drei Instrumente dienen in erster Linie zu Längenbestimmungen an Strichmaßen; zu Messungen an Endmaßen werden sie nur dadurch verwendbar, daß man die Endmaße auf Strichmaße zurückführt, wovon weiter unten die Rede sein soll. Der Komparator wird zur Vergleichung von nahezu gleichen Längen benutzt oder, was dasselbe bedeutet, zur Bestimmung kleiner Längenunterschiede; das Kathetometer ist eigentlich nur ein spezieller Fall des Komparators. Die Teilmaschine endlich dient, außer zur Herstellung von Teilungen, zur Bestimmung von Teilungsfehlern und zur Zurückführung von Unterabteilungen eines Maßstabes auf das Hauptintervall.

Die Komparatoren teilt man ein in Transversal- und Longitudinalkomparatoren. Bei jenen wird die Länge eines Maßstabes durch zwei Mikroskope mit Okularmikrometern auf einen neben ihm liegenden zweiten Maßstab übertragen; beim Longitudinalkomparator liegen beide zu vergleichende Maßstäbe mit ihren Enden gegeneinander verschoben oder gar der eine in der Verlängerung des anderen, so daß die Länge des einen Maßstabes durch Longitudinalverschiebung auf den anderen übertragen wird. Der Longitudinalkomparator, in den übrigens fast jede Teilmaschine leicht verändert werden kann, liefert eine geringere Genauigkeit der Messung. Zu fundamentalen Maßstabvergleichungen dienen deshalb ausschließlich Transversalkomparatoren.

Die Transversalkomparatoren werden in zwei Ausführungen gebaut. Bei der einen Art sind die Mikroskope in einem passenden Abstande voneinander fest montiert und die zu vergleichenden Maßstäbe werden senkrecht zur Verbindungslinie der Mikroskope abwechselnd unter diese gebracht und beobachtet; bei der zweiten Art sind umgekehrt die Maßstäbe fest gelagert und die Mikroskope, die an einer Verbindungsschiene sitzen, werden mit dieser abwechselnd über den einen oder anderen Maßstab geschoben.

Zu Messungen höchster Präzision benutzt man ausschließlich Transversalkomparatoren mit feststehenden Mikroskopen, weil nur so die Unveränderlichkeit der Visierrichtungen genügend gesichert erscheint. Einen derartigen Komparator, den Komparator Brunner, auf dem die Prototypvergleichungen im Bureau international ausgeführt worden sind, zeigt die Figur 4; der Komparator ist in den Werkstätten der Société genevoise gebaut. Die Mikroskope sind hier in 1 m Abstand an soliden Steinpfeilern montiert, die ohne Zusammenhang mit dem Fußboden errichtet sind. Die Maßstäbe befinden sich auf ebenen, allseitig justierbaren Tischen gelagert inmitten großer Kästen, in denen sie durch temperiertes, fließendes Wasser auf einer gewollten konstanten

Temperatur gehalten werden. Indem man die Temperatur des bekannten Maßstabes unverändert läßt, die des unbekannten etwa von 5 zu 5° variiert, findet man zugleich die thermische Ausdehnung des Materials und kann die vollständige Gleichung des letzteren Maßstabes aufstellen. Die Längen-

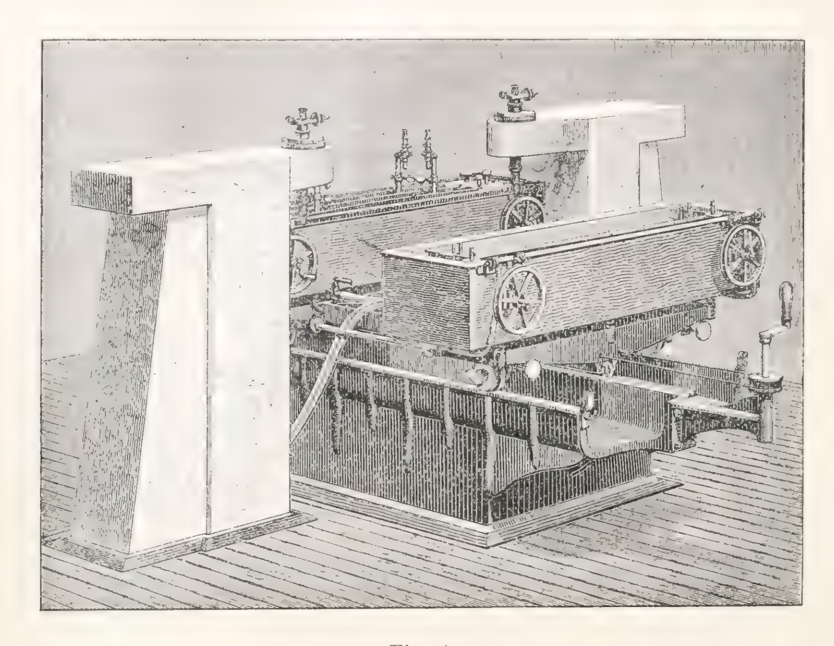


Fig. 4.

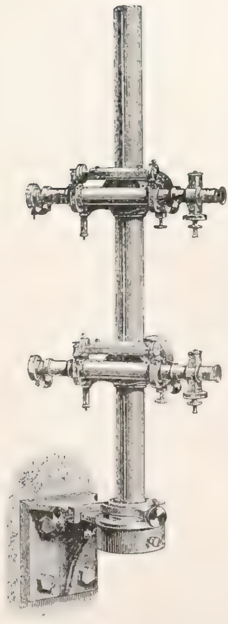


Fig. 5.

vergleichung geschieht jedesmal in der Art, daß man die Lagen der Endstriche beider Maßstäbe in den Mikroskopen links und rechts als Trommeleinstellungen der Okularmikrometer bestimmt, die Differenz der Trommeleinstellungen sowohl links als auch rechts auf Grund absoluter Auswertungen auf metrisches Maß reduziert und mit dem richtigen Vorzeichen in Rechnung bringt.

Die wesentlichen Teile des Kathetometers als vertikalen Transversalkomparators zeigt Figur 5, ebenfalls eine Konstruktion der Société genevoise. Auf einer Säule, die unten und oben (in der Figur nicht wiedergegeben) in Fassungen an einem Stativ oder an der Wand drehbar gelagert ist, gleiten zwei Mikroskope, die in passender Höhe festgestellt werden können. Den Mikroskopen gegenüber befinden sich im gleichen Abstand von ihnen die unbekannte Länge und ein Maßstab. Mit Hilfe der Mikroskope wird wie beim horizontalen Transversalkomparator die unbekannte Länge auf den bekannten Maßstab übertragen und ebenso wie beim Horizontalkomparator ausgewertet. Die zu vergleichenden Längen und die Kathetometersäule müssen untereinander gut parallel sein; man verwirklicht diese Bedingung, indem man alle drei Richtungen vertikal stellt, wozu die auf den Mikroskopen aufgesetzten Libellen dienen.

Als Kathetometer werden vielfach auch Instrumente bezeichnet, die nur e i n Mikroskop tragen. Bei ihnen ist auf die Säule eine Teilung aufgebracht, gegen die die Höhe des Mikroskops bestimmt wird. Das Mikroskop selbst sitzt drehbar auf einem vertikalen Zapfen und kann so auf die zu vergleichenden Höhen gerichtet werden. Die oberen und unteren Höhenlagen können mit einem solchen Instrument nicht gleichzeitig, sondern erst nacheinander eingestellt werden. Aus diesem und aus anderen Gründen vermögen die genannten Instrumente keine so hohe Genauigkeit zu liefern, wie die in Figur 5 dargestellte Konstruktion.

Der Longitudinalkomparator wird gebildet durch einen Schlitten, der sich auf

einer oder zwei zueinander parallelen Gleitbahnen bewegt. Der Schlitten trägt in der Regel zwei mit Okularmikrometern versehene Mikroskope, die sich über die zu vergleichenden Maßstäbe hinwegbewegen, die auf einem parallel zur Gleitbahn angeordneten Tische ruhen. Die Mikroskope laden etwas verschieden aus, sodaß man im einen die Striche des einen, im anderen die Striche des anderen Maßstabes sieht. Zur Vergleichung der Maßstäbe werden die Mikroskope auf die linken Maßstabstriche gerichtet und deren Lage durch die Okularmikrometer fixiert, dann ebenso nach Verschiebung des Schlittens die rechten Maßstabstriche beobachtet; die Berechnung des Längenunterschiedes erfolgt wie bei den Messungen auf dem Transversalkomparator.

Der Longitudinalkomparator wird zur Teilmaschine, wenn außer dem Mikroskop auf den Schlitten noch eine Vorrichtung zum Ziehen von Strichen, ein Reißerwerk, montiert ist. In dieser Form erlaubt die Maschine aber nur, eine schon vorhandene Teilung zu kopieren. Zu solchem Zwecke wird die Mutterteilung mit dem Mikroskop anvisiert, ein Strich durch Grob- und Feinverstellung des ganzen Schlittens eingestellt, und dann der neue Strich gezogen.

Eine Teilung ohne schon vorhandene Mutterteilung kann man nur mit Hilfe einer Schraubenteilmaschine herstellen, wozu freilich die Fehler der Schraube genügend genau bekannt sein müssen. Eine solche von der Firma Sommer und Runge in Berlin gebaute Schraubenteilmaschine (vgl. Zeitschr. f. Instrum. 16, 325, 1896) zeigt die Figur 6. Man sieht hier das durch die Schraube bewegte Mikroskop, mit dem man bei Kopierung die Mutterteilung pointiert — die Schraube dient in diesem Falle nur als Transportmittel — und das Reißerwerk, mit dem man alsdann den Strich auf der neuen Skala herstellt. Bei Anfertigung unabhängiger Teilungen kommt das Mikroskop außer Anwendung; die Einstellung des Reißerwerks auf den Ort des neu zu ziehenden Striches erfolgt dann lediglich durch die Schraube.

Die eigentliche Reißvorrichtung mit dem Stichel bei S, die durch den Handgriff H bedient wird, ist bei D in Spitzenlagerung an dem Gehänge G, das bei A sich gleichfalls in Spitzen bewegt, in dem gußeisernen Bocke B aufgehängt. Die Bewegung der Reißvorrichtung ist eine dreifache, indem gleichzeitig mit dem Abheben des Stichels automatisch der Rücktransport auf den Anfang des neuen Striches verbunden ist.

Die Teilungen werden auf Metall direkt durch den passend beschwerten Stahlstichel aufgebracht. Auf Glas wird zuerst eine Wachsschicht, am besten durch Eintauchen des ganzen zu teilenden Stückes in geschmolzenes weißes Wachs hergestellt, die an den Stellen der künftigen Striche durch den Stichel der Teilmaschine entfernt wird. Die Fixierung der Striche geschieht durch dampfförmige oder flüssige Flußsäure, die wohl Glas ätzt, die schützende Wachsschicht aber nicht angreift. Sehr feine Teilungen auf Glas werden mit Hilfe des Diamanten hergestellt.

7. Bestimmung von Teilungsfehlern. Bei der Bestimmung von Teilungsfehlern nimmt man zunächst an, daß die Gesamtlänge der Skale richtig ist. Sofern auch die Gesamtlänge mit einem Fehler behaftet ist — dieser Fehler wird ja übrigens mit der Temperatur veränderlich sein — braucht er später nur proportional auf die einzelnen Intervalle verteilt zu werden.

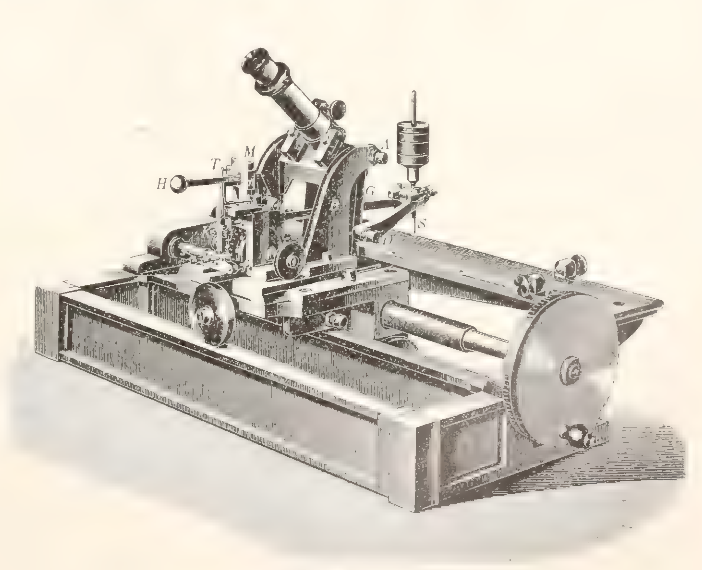


Fig. 6.

Die inneren Fehler einer aus nahezu gleichen Intervallen bestehenden Teilung kann man nach drei Methoden ermitteln. Die erste, die Hansensche Methode, bedarf eines Hilfsintervalles, das den Inter-

vallen der Skale nahezu gleich ist. Man bezeichne die Länge dieses Intervalles mit Z. Dann finde man durch Vergleichung, daß die vier Intervalle einer von links nach rechts gezählten Skale [0 ∼ 4] folgende Beziehungen zu Z haben

$$[0 \sim 1] = Z + 5\,\mu$$
$$[1 \sim 2] = Z - 11\,\mu$$
$$[2 \sim 3] = Z - 3\,\mu$$
$$[3 \sim 4] = Z + 17\,\mu.$$

Addiert man diese Gleichungen, so ist die Gesamtlänge L der Skala

$$L = [0 \sim 1] + [1 \sim 2] + [2 \sim 3] + [3 \sim 4] = 4\,Z + 8\,\mu,$$

woraus folgt

$$Z = \tfrac{1}{4}\,L - 2\,\mu$$

oder wenn man dies in die obigen Beobachtungsgleichungen einführt:

$$[0 \sim 1] = \tfrac{1}{4}\,L + 3\,\mu$$
$$[1 \sim 2] = \tfrac{1}{4}\,L - 13\,\mu$$
$$[2 \sim 3] = \tfrac{1}{4}\,L - 5\,\mu$$
$$[3 \sim 4] = \tfrac{1}{4}\,L + 15\,\mu.$$

Das Intervall [0 ∼ 1] ist also um 3 μ zu groß, [1 ∼ 2] um 13 μ zu klein usw. Durch Addition mehrerer Gleichungen kann man finden

$$[0 \sim 1] = \tfrac{1}{4}\,L + 3\,\mu$$
$$[0 \sim 2] = \tfrac{2}{4}\,L - 10\,\mu$$
$$[0 \sim 3] = \tfrac{3}{4}\,L - 15\,\mu$$
$$[0 \sim 4] = \tfrac{4}{4}\,L.$$

In dieser Form erkennt man, daß der Strich 1 um 3 μ zu weit nach rechts, Strich 2 um 10 μ zu weit nach links und Strich 3 ebenfalls um 15 μ zu weit nach links liegt. Man sagt nun, die einzelnen Striche der Skale haben gewisse Korrektionen und zwar betragen diese Korrektionen im vorgeführten Beispiel

$$c_0 = 0;\; c_1 = +3\,\mu;\; c_2 = -10\,\mu;$$
$$c_3 = -15\,\mu;\; c_4 = 0.$$

Mit Hilfe dieser Korrektionen ist es leicht, die Größe irgendeines Intervalles der Skale zu berechnen; beispielsweise ist die Größe des Intervalls

$$[1 \sim 3] = \tfrac{2}{4}\,L + c_3 - c_1 = \tfrac{2}{4}\,L - 18\,\mu$$

was sich aus den vorstehenden Gleichungen der einzelnen Intervalle leicht verifizieren läßt.

Die H a n s e n sche Methode genügt insofern nicht den höchsten Ansprüchen an Präzision, als die Genauigkeit, mit der die Korrektionen der einzelnen Striche ermittelt werden, nicht gleich ist, sondern symmetrisch zur Mitte, bei längeren Skalen sogar ganz erheblich abnimmt. Bessere Resultate liefert bereits die erweiterte H a n s e n sche Methode, die nicht ein Hilfsintervall, sondern mehrere, die Vielfache des ersten sind, benutzt. In ihrer vollkommensten Form fordert sie für eine Teilung von n nahezu gleichen Intervallen (n — 1) Hilfsintervalle, die gleich dem Einfachen, Zweifachen usw. bis (n — 1)-fachen eines Intervalls der Teilung sind. In unserem Beispiel von vier Intervallen würde man also nicht nur das Hilfsintervall Z gebrauchen, sondern noch zwei weitere Hilfsintervalle, die nahezu gleich 2 Z und 3 Z sind. Diese werden dann noch soweit möglich mit Intervallen der Skale verglichen, also 2 Z mit [0 ∼ 2], [1 ∼ 3], [2 ∼ 4], ferner 3 Z mit [0 ∼ 3], [1 ∼ 4]. Dies gibt dann ein System von Gleichungen, aus denen man die Korrektionen c_1, c_2, c_3 mit höherer Genauigkeit ausrechnen kann.

Noch genauer als nach der erweiterten H a n s e n schen Methode arbeitet man nach einem Verfahren, welches man die Methode des Durchschiebens nennt. Diese Methode erfordert zwei Skalen von nahezu gleichen Einzelintervallen, wobei die Skalen selbst verschieden lang sein können. Man legt beide Skalen so an- oder aufeinander, daß nur je ein Intervall, etwa das äußerste rechte Intervall der einen mit dem äußersten linken Intervall der anderen, sich überdecken, und bestimmt die Lagenunterschiede der beiden Strichpaare. Dann verschiebt man die eine Skale um ein Intervall, so daß sich zwei Intervalle überdecken und drei Strichpaare gemessen werden, usw. Setzt man das Verfahren fort, so liegen später beide Skalen nebeneinander, wandern dann nach der anderen Seite wieder auseinander, bis sich auch dort wieder nur je ein Intervall überdecken. Die Berechnung der Korrektionen, worauf hier nicht weiter eingegangen werden kann, gestaltet sich recht einfach; man erhält gleichzeitig die Korrektionen beider Skalen.

8. Einfache Vorrichtungen zur Messung von Endlängen (Kalibermaßen und Dicken). Alle diese Vorrichtungen beruhen auf dem Prinzip, daß die zu messende Endlänge zwischen einen festen und einen beweglichen Anschlag gebracht wird und daß die Stellung des beweglichen Anschlages, ausgehend von der Nullage, in der sich beide Anschläge berühren, abgelesen wird. Die Ablesung des beweglichen Anschlages gegenüber der Ablesung mit bloßem Auge zu verfeinern, dienen die beiden auch schon bei der Ausmessung von Strichlängen benutzten Hilfsmittel Nonius und Schraube, außerdem noch Vorrichtungen, die auf dem Prinzip des ungleicharmigen Hebels, des Keils u. dgl. beruhen. Diese zuletzt genannten Vorrichtungen, die im allgemeinen eine geringere Maßgenauigkeit liefern, mögen vorweg genommen werden.

8a) F ü h l h e b e l , M e ß k e i l u. dgl. Der Fühlhebel (Fig. 7) ist ein ungleicharmiger Hebel, dessen kürzerer Arm den beweglichen Anschlag bildet und dessen längerer Arm über einer Kreisskale spielt. Mit Fühlhebel

ausgestattete Instrumente haben in der Regel nur ein kleines Meßbereich; sie werden deshalb auch nur zur Bestimmung sehr kleiner Längenänderungen, wie z. B. der Längenänderungen, die durch Erwärmungen hervorgebracht werden, benutzt, insbesondere trifft man das Fühlhebelprinzip häufig bei registrierenden oder Zeigerinstrumenten (Thermograph u. dgl.). Der Fühlhebel liefert nur relative Angaben, muß also auf metrisches Maß erst geeicht werden.

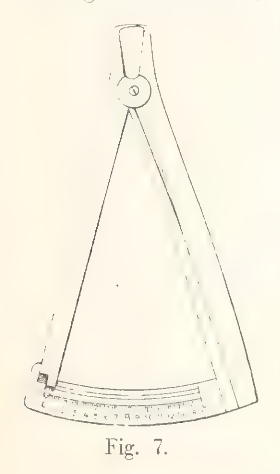


Fig. 7.

Der Meßkeil wird in der Regel als Doppelkeil benutzt. Er besteht dann aus zwei gleichen flachen Keilen, deren Querschnitte rechteckige Dreiecke sind. Die beiden Keile liegen gegeneinander gewendet mit ihren Hypotenusenflächen aufeinander, so daß die beiden großen Kathetenflächen unter sich parallel sind. Durch gegenseitiges Verschieben beider Keile werden beide Kathetenflächen einander genähert oder voneinander entfernt, die Vorrichtung kann also dazu dienen, eine von zwei festen Anschlägen begrenzte Länge, eine Lehre, in die der zu messende Körper eingelegt ist, außer diesem auszufüllen. Durch den Meßkeil wird also gewissermaßen der eine der beiden festen Anschläge der Lehre in einen beweglichen verwandelt; die Länge des Meßstückes ergibt sich dann als Differenz zwischen der Weite der Lehre und der Entfernung der Kathetenflächen des Meßdoppelkeiles. Diese Entfernung kann nach erfolgter Eichung an Teilungen, die längs einer oder beider Hypotenusenkanten aufgebracht sind, abgelesen werden.

Verwandt mit dem Meßkeil ist die Drahtlehre, die durch einen keilförmigen Einschnitt in ein Metallstück oder dgl. gebildet wird. Je dünner der Draht ist, um so tiefer läßt er sich in die keilförmige Lehre hineinschieben; seine Dicke kann an einer längs des Keiles angebrachten Teilung abgelassen werden.

8b) N o n i u s. Der Nonius findet Verwendung bei der Schublehre, wie sie in Figur 8 abgebildet ist. Außer Längen und Stab- oder äußeren Rohrdurchmessern erlaubt die Schublehre durch Benutzung der unteren Enden der Taster, deren Dimensionen bekannt sein müssen, auch innere Kaliber abzugreifen. Mit Hilfe der oberen Spitzen sind auch Strichentfernungen u. dgl. meßbar. Bemerkenswert ist, daß die Schublehre nicht wie Fühlhebel, Meßkeil u. a. m. erst mit bekannten Kaliberkörpern geeicht werden muß. Sie verwandelt vielmehr die Endlängen direkt in Strichlängen. Der in Rechnung zu setzende Nullpunkt der Teilung, der von dem bezifferten Nullpunkt je nach der Güte des Instrumentes mehr oder weniger abweichen kann, wird durch Aneinanderschieben beider Taster gefunden.

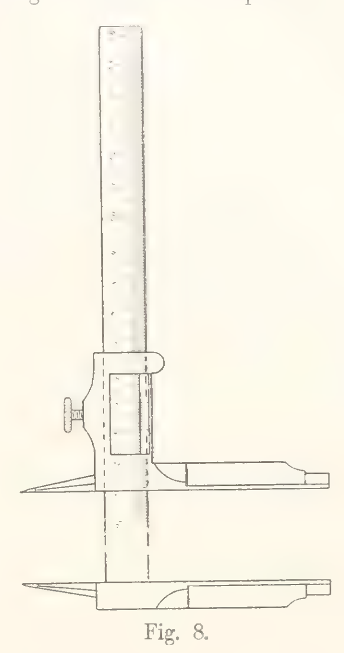


Fig. 8.

8c) S c h r a u b e. Das bei weitem feinste Hilfsmittel zur Ausmessung von Endlängen ist wiederum die Schraube, die hierbei wesentlich in zwei Formen, als Schraubenmikrometer mit meist horizontal liegender Schraube, und als Sphärometer mit vertikal angeordneter Schraube verwendet wird.

Das Schraubenmikrometer ist in Figur 9 dargestellt. Der bewegliche Anschlag wird hier durch eine Schraube gebildet, die in einer langen Mutter läuft. Die Schraube hat meist eine Ganghöhe von 1 mm, wobei die Trommel in 100 Teile geteilt ist. Eine

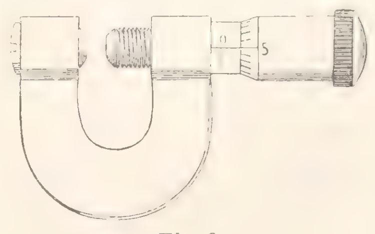


Fig. 9.

Drehung der Schraube um ein Intervall der Schraubentrommel entspricht also einer Veränderung der Oeffnung des Mikrometers um 10 μ. Das Schraubenmikrometer ist zunächst zur Vergleichung nahe gleicher Kaliberkörper, also zur Messung kleiner Längendifferenzen bestimmt; da hierzu nur eine angenäherte Kenntnis der Höhe eines Schraubenganges nötig ist, so kann die einfache Vorrichtung recht genaue Resultate geben, namentlich wenn man dafür sorgt, daß Erwärmungen der Schraube und des Bügels während der Messungen vermieden werden. In neuerer Zeit sind die Mikrometerschrauben fabrikationsmäßig mit einem so hohen Grade der Vollkommenheit hergestellt, daß sie in der Technik auch zu absoluten Messungen mit genügender Genauigkeit benutzt werden.

Eine Verfeinerung der Schraubenmikrometer sind die Meßmaschinen, bei denen an Stelle des Bügels der Schraubenmikrometer ein solider Unterbau tritt, der ein Lager für die zu vergleichenden Maßkörper enthält. Um die Meßmaschine auch für die Bestimmung absoluter Längen tauglich zu machen, trägt der bewegliche Anschlag ein Mikroskop, mit dem man auf eine feste Skala visiert, oder aber der bewegliche Anschlag trägt eine Skale, auf die man ein feststehendes Mikroskop richtet. Der Nullpunkt der Skale wird wieder, ähnlich wie bei der Schublehre, durch Aneinanderschieben beider Anschläge ohne zwischenliegenden Kaliberkörper bestimmt. Eine Fehlerquelle bei den Messungen mit dem Schraubenmikrometer liegt darin, daß der Druck, den man mit der Schraube auf das Maßstück ausübt, nicht genügend definiert wird. Diese Unsicherheit wird bei den Meßmaschinen dadurch vermieden, daß man auch den festen Anschlag etwas beweglich macht, so daß er rückwärts einen Indikator für die Größe des ausgeübten Druckes betätigt. Ein solcher Indikator ist beispielsweise ein mit Flüssigkeit gefülltes flaches Metallreservoir, das sich nach oben hin in ein graduiertes Steigrohr fortsetzt. Einem bestimmten Druck auf den Maßkörper entspricht dann ein Ansteigen der Flüssigkeit im Rohr bis zu einer bestimmten Höhe.

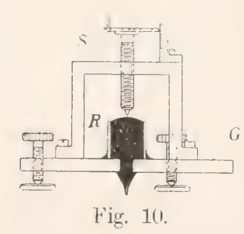


Fig. 10.

Ein Sphärometer ist in Figur 10 abgebildet. Die Schraube S, die an Stelle der sonst üblichen Trommel eine geteilte Maßscheibe trägt, wird von einem kräftigen Bügel getragen, der auf einer Grundplatte G aufsitzt. Das Sphärometer dient ursprünglich, wie es auch der Name besagt, zur Ausmessung gekrümmter Flächen (Linsen, Quecksilberkuppen u. dgl.). Für solche Zwecke ist das untere Ende der Schraube zu einer feinen Spitze ausgebildet. Man stellt dann die Spitze gar nicht erst auf Berührung mit der Fläche ein, sondern nähert die Spitze dem Objekt nur soweit, daß sich die Spitze und ihr Spiegelbild in der Fläche nahezu zu berühren scheinen. Auf diese Weise ist die beim Schraubenmikrometer angezeigte Fehlerquelle, die in der mangelnden Kenntnis des Druckes auf das Maßstück beruht, gänzlich vermieden.

9. Vergleichung von Endmaßen untereinander und mit Strichmaßen auf dem Komparator. Messungen auf dem Komparator, bei denen Endmaße eingehen, werden mit Hilfe von Anschiebezylindern ausgeführt. Anschiebezylinder sind kleine zylindrische Körperchen, die mit schwachem Druck so beiderseits an das Endmaß angelegt werden, daß alle drei Längsachsen in eine gerade Linie fallen. Die Anschiebezylinder tragen auf der Oberfläche, besser noch auf kleinen Flächen, die in Aussparungen auf der Achse der Körperchen sich befinden, beiderseits einen oder mehrere Striche. Auf diese Weise ist das Endmaß in ein Strichmaß verwandelt, und kann mit einem anderen ebensolchen verglichen werden. Sollen zwei Endmaße miteinander verglichen werden, so braucht man nur das eine durch das andere zu ersetzen, in derselben Weise, wie man beim Transversalkomparator einen Maßstab an die Stelle des anderen führt. Soll ein Endmaß auf ein Strichmaß bezogen werden, so hat man noch die Länge der Anschiebezylinder bis zu den Strichen zu eliminieren, was in der Weise geschieht, daß man die Anschiebezylinder direkt aneinanderführt und abermals die Entfernung der Striche voneinander mit Hilfe eines Strichmaßstabes ermittelt. Die Länge des Endmaßes findet sich dann als Differenz der beiden Messungsresultate.

Man kann ohne Anschiebezylinder auskommen, wenn man gleichzeitig wenigstens drei Endmaße der Untersuchung unterwirft, deren jedes einen Strich in beliebiger Entfernung von den Enden trägt. Die drei Stäbe seien A, B und C, ihre Teile zwischen Strich und Ende A_1 und A_2, B_1 und B_2, C_1 und C_2. Bei Aneinanderschieben je zweier der drei Endmaße mißt man dann komparatorisch durch Uebertragung auf ein Strichmaß folgende Strichlängen

$$\begin{aligned}
A_1 + B_2 &= a \\
A_1 + C_2 &= b \\
B_1 + C_2 &= c \\
B_1 + A_2 &= d \\
C_1 + A_2 &= e \\
C_1 + B_2 &= f
\end{aligned}$$

wo a, b, c, d, e, f Längen des Strichmaßstabes bedeuten. Aus den 6 Beobachtungsgleichungen ergibt sich dann

$$
\begin{aligned}
A = A_1 + A_2 &= b - c + d \\
&= e - f + a \\
B = B_1 + B_2 &= d - e + f \\
&= a - b + c \\
C = C_1 + C_2 &= f - a + b \\
&= c - d + e
\end{aligned}
$$

10. Endmaßesätze. Die drei Längen A, B und C brauchen für die Anwendbarkeit der beschriebenen Methode keineswegs einander gleich zu sein. Man kann sich also auf diese Weise Sätze von Endmaßen (Kaliberkörpern) herstellen, entsprechend der unter 7 behandelten Aufgabe, die Teilungsfehler eines Strichmaßstabes zu bestimmen. Ein Bedürfnis nach solchen Endmaßsätzen hat bisher nur in geringem Umfange bestanden. Die Maschinenindustrie zieht es vor, für jeden Fall eigens hergestellte Kaliberkörper zu benutzen, anstatt ein gewünschtes Maß aus mehreren einzelnen zusammenzubauen. Hierfür sind einerseits Bequemlichkeitsrücksichten maßgebend, andererseits waren noch bis vor ganz kurzer Zeit die Kaliberkörper wenig exakt gearbeitet, so daß durch ein Aufeinanderlegen mehrerer unkontrollierbare Fehler entstanden. In den letzten Jahren ist die Fabrikation von Kaliberkörpern derart vervollkommnet, daß die Längenunsicherheit bei Zusammensetzung mehrerer Kaliberkörper auf kleine Beträge eingeschränkt ist. Damit gewinnt die Untersuchung von Endmaßesätzen erneutes Interesse.

Man bedient sich dazu des Schraubenmikrometers oder, bei höheren Ansprüchen an die Genauigkeit, der Meßmaschine, indem man den Grundsatz aufstellt, daß man zur möglichsten Verringerung der Messungsfehler immer nur nahezu gleiche Längen miteinander vergleicht. Die Aufgabe kommt dann auf dasselbe hinaus, wie die Etalonnierung von Massensätzen, die an anderer Stelle (vgl. den Artikel „Massenmessung") besprochen wird. Die Längen der einzelnen Kaliberkörper müssen in einem derartigen Verhältnis zueinander stehen, daß es möglich ist, aus ihnen die nächsthöhere Einheit aufzubauen und daß die Stücke einzeln oder in Summen so miteinander verglichen werden können, daß der Fehler jedes einzelnen Stückes gefunden werden kann. Ein Endmaßesatz bestehe beispielsweise aus den Stücken a_1, a_2, a_3, a_4 von den Nennwerten 1, 2, 3, 4 cm, so findet man durch Vergleichung der Summe mit der nächsthöheren Einheit etwa

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 10\,\text{cm} - 2\,\mu$$

und durch innere Vergleichung

$$(a_1 + a_4) = (a_2 + a_3) + 14\,\mu$$

Hieraus ergeben sich die beiden Summen einzeln

$$a_1 + a_4 = 5\,\text{cm} + 6\,\mu \qquad a_2 + a_3 = 5\,\text{cm} - 8\,\mu$$

Nimmt man hierzu noch die beiden weiteren möglichen Vergleichungen, die die Resultate

$$(a_3 + a_1) = a_4 - 3\,\mu \text{ und}$$
$$(a_2 + a_1) = a_3 + 6\,\mu$$

ergeben mögen, so hat man vier Gleichungen mit vier Unbekannten, aus denen sich berechnet:

$$a_1 = 1\,\text{cm} + 4\,\mu;\; a_2 = 2\,\text{cm} - 3\,\mu;$$
$$a_3 = 3\,\text{cm} - 5\,\mu;\; a_4 = 4\,\text{cm} + 2\,\mu.$$

11. Längenmessungen mittels Lichtinterferenzen. Von den Interferenzerscheinungen, die in einem besonderen Artikel behandelt werden (vgl. den Artikel „Interferenz des Lichts"), sind namentlich zwei für die Zwecke der Längenmessungen nutzbar gemacht worden, die Fizeauschen Streifen, die einen Spezialfall der Newtonschen Ringe darstellen, und die Haidingerschen Ringe. Die zuerst genannten treten an schwach keilförmigen Luftplatten auf; die einzelnen Interferenzstreifen verbinden alle Punkte gleicher Dicke der Luftplatte. Die Haidingerschen Ringe andererseits werden an planparallelen Luftplatten beobachtet; sie sind Kurven gleicher Strahlenneigung. Beide Interferenzerscheinungen haben das gemeinsam, daß sie sich um ein Streifenintervall verschieben, wenn sich die Dicke der Luftplatte um eine halbe Wellenlänge der benutzten Lichtart ändert. Beobachtet man umgekehrt, daß sich das Interferenzsystem gegen eine feste Marke so weit verschiebt, daß ein folgender Streifen die Lage des vorhergehenden eingenommen hat, so schließt man daraus, daß sich die Dicke der Luftplatte um eine halbe Wellenlänge — je nach dem Richtungssinn der Streifenwanderung — vergrößert oder verkleinert hat. Beträgt die Verschiebung des Interferenzensystems Bruchteile eines Streifenintervalls, so war auch die Dickenänderung im Verhältnis weniger als eine halbe Wellenlänge. Da eine halbe Wellenlänge im sichtbaren Spektralgebiet nur $^1/_5$ bis $^1/_3$ μ beträgt, so ist die auf Interferenz gegründete Methode der Längenmessung der gewöhnlichen Komparatormethode in vielen Fällen überlegen.

11a) Fizeausche Streifen. Die Benutzung der Fizeauschen Streifen ist auf geringe Dicken der Luftplatte beschränkt; für Dicken von mehr als 50 000 Halbwellen, das sind im Mittel etwa 15 mm, wird die Interferenzerscheinung auch für die schärfsten Spektrallinien verwaschen. Das Hauptanwendungsgebiet der Fizeauschen Interferenzstreifen ist daher die Bestimmung kleiner Längenänderungen, z. B. solcher wie sie kurze Körperchen infolge Temperaturänderungen erleiden; auch beim Studium der elastischen Eigenschaften, bei der Messung kleiner Drucke u. a. m. sind die Fizeauschen Interferenzen mit Vorteil verwendet worden.

Die ersten Versuche zur Bestimmung

der Wärmeausdehnung nach der Interferenzmethode sind um die Mitte des vorigen Jahrhunderts von F i z e a u selbst angestellt worden. Er benutzte hierzu eine Vorrichtung aus Stahl (Fig. 11), eine ebene Grundplatte, die von drei Schrauben durchsetzt war. Die Schrauben waren nach oben hin zugespitzt und trugen eine schwach konvexe Linse b, die zur Orientierung über die Lage des Interferenzsystems mit Marken versehen war. Zwischen der oberen polierten Fläche der stählernen Grundplatte und der ihr zugewandten Linsenfläche wurden bei Beleuchtung der Apparatur mit monochromatischem Licht (Natriumlicht) Interferenzen erzeugt und mit deren Hilfe wurde die Wärmeausdehnung der Stahlschrauben gefunden. Sollte jetzt die Wärmeausdehnung irgend eines anderen oberflächlich spiegelnden Körpers gemessen werden, so wurde dieser inmitten der Stahlschrauben auf dem Stahltischchen aufgebaut und zwischen seiner Oberfläche a und der Unterfläche der Linse b wiederum das Interferenzbild hergestellt. Eine Messung lieferte dann die relative Ausdehnung des Körpers gegenüber den Stahlschrauben, woraus sich die absolute Ausdehnung des Körpers leicht als Differenz ableiten ließ. Bei den relativen Messungen konnte man durch Hinein- oder Herausdrehen der Schrauben die Luftplatte beliebig dünn einstellen; auch konnte man mit Hilfe der Schrauben den Keilwinkel der Luftplatte variieren, der den Abstand der einzelnen Interferenzstreifen voneinander bedingt.

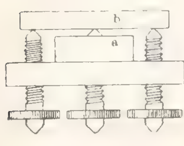


Fig. 11.

Die alte F i z e a u sche Methode ist in neuerer Zeit vielfach verbessert worden. Während F i z e a u nur mit einer einzigen Spektralfarbe operierte, schlug A b b e die Benutzung mehrerer derselben gleichzeitig vor. Um die Tragweite dieses Vorschlages beurteilen zu können, vergegenwärtige man sich, daß die einzelnen Interferenzstreifen, die durch das Gesichtsfeld wandern, in keiner Weise von einander unterschieden sind. Man war daher gezwungen, die an einer Marke vorbeiwandernden Streifen direkt zu zählen, was meist sehr mühsam, oft aber auch überhaupt nicht ausführbar ist. In solchen Fällen bietet die Benutzung mehrerer Wellenlängen Vorteil. Die Dickenänderung der Luftplatte ist nämlich wie schon oben angedeutet, gegeben durch die Anzahl m der durch das Gesichtsfeld gewanderten Streifenintervalle, deren jedes einer Dickenänderung um eine halbe Wellenlänge entspricht. Multipliziert man also m mit der halben Wellenlänge $\lambda/_2$, so drückt das Produkt $m.\lambda/_2$ die Dickenänderung in metrischem Maße, etwa in μ aus, wenn auch λ in μ gegeben war. Die Größe $m.\lambda/_2$ ist nun unabhängig von der benutzten Wellenlänge; führt man daher die Messung in mehreren Wellenlängen gleichzeitig aus, so müssen alle so erhaltenen Produkte $m_1\lambda_1/_2$, $m_2\lambda_2/_2$ usw. einander gleich sein. Die Zahlen m sind im allgemeinen gebrochene Zahlen, d. h, sie geben mehrere ganze Streifenintervalle und die Summe zweier Bruchteile (Anfangs- und Endlage) an. Mißt man nun die Bruchteile etwa mittels Okularmikrometer mit großer Schärfe und ist außerdem, was fast stets der Fall ist, die Dickenänderung der Luftplatte angenähert bekannt, so lassen sich mit Hilfe der Bedingung der Gleichheit der Produkte $m.\lambda/_2$ die ganzen durchgegangenen Streifenintervalle für jede benutzte Spektralfarbe mit Sicherheit rechnerisch finden.

Die Möglichkeit der Beobachtung in mehreren Spektralfarben ist bei einem von P u l f r i c h konstruierten Apparat (Fig. 12) verwirklicht. Die Beobachtung geschieht mit Hilfe eines horizontal angeordneten

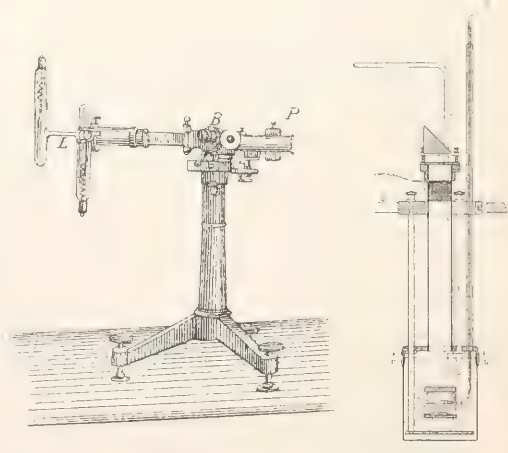


Fig. 12. Fig. 13.

Fernrohres B, das gleichzeitig auch zur Beleuchtung des Interferenzapparates dient. Als Lichtquelle dient eine G e i ß l e r sche Röhre L (Wasserstoff oder Helium mit etwas Quecksilber, wodurch ein großer Reichtum an Spektrallinien erzeugt wird) mit gerader Durchsicht. Das parallel austretende Licht wird durch zwei Prismen spektral zerlegt, dann durch ein totalreflektierendes Prisma (Fig. 13) vertikal nach unten auf den F i z e a u schen Apparat geworfen und geht auf demselben Wege zum Beobachtungsrohr zurück. Die verschiedenen Spektralfarben werden durch Drehen des Beobachtungsrohres B ins Gesichtsfeld gebracht.

Eine weitere wesentliche Verbesserung

der Fizeauschen Methode betrifft den Fizeauschen Apparat selbst. Stahl, das Material, aus dem das von Fizeau benutzte Tischchen bestand, ist bekanntlich nicht frei von thermischen Nachwirkungen, die die gewonnenen Resultate fehlerhaft beeinflussen. Pulfrich wählte darum als Material Bergkristall und gab dem Tischchen eine dreiteilige Form (Fig. 14). Die Einzelteile der Apparatur, nämlich die Grundplatte G, die Deckplatte D und der die Dicke der Luftplatte zwischen der Oberfläche von G und der Unterfläche von D bestimmende ringförmige Körper R wurden senkrecht zur optischen Achse des Bergkristalls geschliffen. Der Ring R tritt hier somit an die Stelle der in der Höhe veränderlichen Schrauben; er ist also anstatt dieser in bezug auf die Wärmeausdehnung absolut zu untersuchen. Während bei der alten Fizeauschen Anordnung die Höhe der Schrauben entsprechend den Dimensionen des Versuchskörpers eingestellt werden konnte, muß bei dem Pulfrichschen Ring der Versuchskörper umgekehrt nach der Höhe des Quarzringes abgeschliffen werden. Hiermit ist aber keine wesentliche Unbequemlichkeit verknüpft. Neuerdings benutzt man statt der Apparatur aus Bergkristall vielfach eine solche aus Quarzglas, einem Material, das nur eine geringe thermische Ausdehnung besitzt und deshalb manche Vorteile bietet.

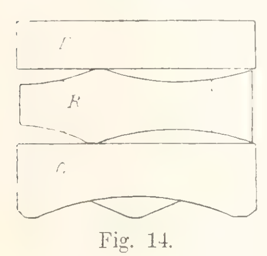


Fig. 14.

Unter Benutzung der Abbeschen Methode ist es auch möglich durch Fizeausche Interferenzen die Dicken dünner Luftplatten absolut mit großer Genauigkeit zu messen. Um die Art einer solchen Messung zu verstehen, denke man sich bei einer relativen Ausdehnungsbestimmung die Lage der Interferenzstreifensysteme in mehreren, etwa vier Spektralfarben, gegen eine feste Marke gemessen, wie das folgende Beispiel zeigt:

	$\lambda/2$	Bruchteile von m
Rot Helium	0,3338 μ	0,674
Gelb Helium	0,2938 μ	0,983
Grün Quecksilber	0,2730 μ	0,306
Grün Helium	0,2508 μ	0,297

Denkt man sich jetzt die Dicke der Luftplatte kontinuierlich abnehmend, so ändern sich die Einstellungen der Interferenzsysteme kontinuierlich, bis bei Berührung beider spiegelnden Flächen, d. h. bei der Dicke der Luftplatte gleich Null alle Interferenzsysteme die gleiche Phase Null haben, oder bis alle Bruchteile von m gleichzeitig gleich Null geworden sind. Die absolute Dicke der Luftplatte beträgt somit in μ:

$$(a + 0{,}674)\,0{,}3338 = (b + 0{,}983)\,0{,}2938 = (c + 0{,}306)\,0{,}2730 = (d + 0{,}297)\,0{,}2508$$

wo die a b c d ganze Zahlen sind. Messungen des Pulfrichschen Ringes und des zwischengesetzten Körpers mittels Schraubenmikrometer hatten als Differenz für die Dicke der Luftplatte den Wert 9,942—9,903 mm oder 39 μ ergeben. Hiermit läßt sich nur ein Wertsystem a = 119, b = 135, c = 146, d = 159 in Einklang bringen, so daß die Dicke der Luftplatte

$$\begin{aligned} 119{,}674 \times 0{,}3338\ \mu &= 39{,}947\ \mu \\ 135{,}983 \times 0{,}2938\ \mu &= 39{,}951\ \mu \\ 146{,}306 \times 0{,}2730\ \mu &= 39{,}941\ \mu \\ 159{,}297 \times 0{,}2508\ \mu &= 39{,}952\ \mu \end{aligned}$$

im Mittel 39,95 μ beträgt.

Es mag noch bemerkt werden, daß für die Lichtwellenlängen stets die Werte einzusetzen sind, die dem die Luftplatte erfüllenden Medium entsprechen. Im vorhergehenden Beispiel ist hierfür das Vakuum angenommen. In atmosphärischer Luft sind alle Wellenlängen im Verhältnis des Brechungsexponenten (rund 1,0003) kleiner. Wäre also die Luftplatte mit atmosphärischer Luft erfüllt gewesen, so würde ihre Dicke

$$\frac{39{,}95}{1{,}0003}\ \mu = 39{,}94\ \mu$$

sein. Der Korrektionsbetrag 0,01 μ fällt natürlich nicht ins Gewicht. Bei dickeren Luftplatten, sowie bei Ausdehnungsmessungen zwischen weiten Temperaturgrenzen nimmt die Korrektion indessen Werte an, die von derselben Größenordnung werden wie die gemessenen Längenänderungen. In diesem Falle kann es von Vorteil sein, die Messungen im luftleeren Raum anzustellen.

11b) Haidingersche Ringe. Die Verwendung der Haidingerschen Ringe an planparallelen Luftplatten kann in derselben Weise erfolgen wie die der Fizeauschen Streifen. Gegenüber diesen bieten aber die Haidingerschen Ringe den großen Vorteil, daß sie über weit größere Längen benutzbar sind, während die Methode der Fizeauschen Streifen, wie schon oben hervorgehoben wurde, bereits bei Längen über 15 mm versagt. Auf dieser Eigenschaft der Haidingerschen Ringe beruht ihre Anwendung zur Auswertung des Meters in Lichtwellenlängen, die im folgenden skizziert werden soll.

Eine wesentliche Eigentümlichkeit dieser Messungen bildet die gleichzeitige Verwendung der Haidingerschen und der Fizeauschen Interferenzen. Während den Haidingerschen Ringen die Aufgabe zufällt, weite Strecken zu überbrücken, dienen die Fizeauschen Streifen dazu, die vollkommene Berührung zweier planer Flächen oder vielmehr die Durchdringung dieser beiden Flächen längs einer geraden Linie zu erkennen.

Zu diesem Zwecke werden die Fizeauschen Streifen zwischen den Flächen nicht mit monochromatischem, sondern mit weißem Lichte erzeugt. Man erhält dann farbige Streifen, die aus der Uebereinanderlagerung der verschiedensten Interferenzsysteme entstehen und kontinuierlich ineinander übergehen. Nur in der Berührungslinie beider Flächen sieht man einen farblosen, schwarzen Streifen, der mit Sicherheit daran zu erkennen ist, daß die Farben symmetrisch um ihn verteilt sind.

Eine solche Durchdringung zweier planer Flächen längs einer Linie kann in Wirklichkeit nicht hervorgebracht werden. Wohl aber läßt sich der Fall dadurch realisieren, daß man die beiden spiegelnden Flächen nicht hintereinander aufbaut, sondern etwa rechtwinkelig zueinander anordnet und durch passend aufgestellte Spiegel das virtuelle Bild der einen Fläche der zweiten reellen Fläche nahezu parallel macht. Das virtuelle Flächenbild nennt Michelson, dem die Wissenschaft die erste Ausführung dieser schönen Messungen verdankt, die Referenzebene. Die ganze Anordnung bezeichnet man als Interferometer.

Michelson benutzt Maßstäbe von einer Form, wie sie die Figur 15 wiedergibt. Der Maßstab besteht aus einem Bronzegestell B mit Handgriff H, auf dem zwei

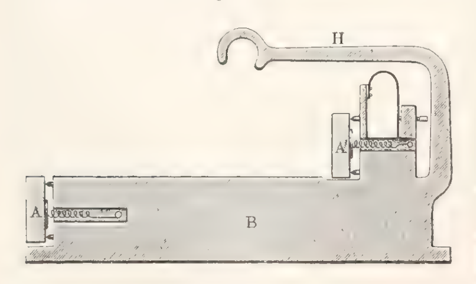


Fig. 15.

ebene, einander parallele, allseitig fein justierbare Spiegel A und A′ angeordnet sind. Als Länge des Maßstabes gilt die senkrechte Entfernung der beiden Spiegelebenen.

Ein solcher Maßstab wird im Interferometer zwischen der festen Spiegelebene und der Referenzebene derart aufgestellt, daß seine Ebenen mit den Interferometerebenen einen sehr kleinen Winkel bilden. Während also zwischen der Referenzebene und der festen Interferometerebene Haidingersche Interferenzen entstehen, beobachtet man zwischen der Referenzebene und den Maßstabebenen Fizeausche Streifen, insbesondere bei Durchdringung dieser Ebenen die oben geschilderte schwarze Linie. Das Meßprinzip besteht nun abgesehen von Einzelheiten, wegen deren auf die einschlägige Literatur verwiesen werden mag, darin, daß man die Referenzebene in kontinuierlicher Bewegung nacheinander längs einer auf ihr fixierten Linie mit den beiden Maßstabebenen zur Durchdringung bringt und gleichzeitig die zwischen den beiden Interferometerebenen entstehenden oder vergehenden Haidingerschen Ringe, die ganzen Ringbreiten durch direkte Zählung, die Bruchteile durch mikrometrische Messung, ermittelt.

Eine solche Zählung hat Michelson an einem Maßstab von $2^{-8} \times 10$ cm $= 0{,}039$ cm (entsprechend etwa 1200 Haidingerschen Ringen) tatsächlich ausgeführt. Aus der Länge dieses Maßstabes leitete er dann die eines nahe doppelt so langen $2^{-7} \times 10$ cm in der Weise her, daß er beide, den kürzeren und den längeren, nebeneinander in verschiedenen Lagen zwischen den Interferometerebenen aufstellte. In der ersten Lage befanden sich die beiden vorderen Maßstabflächen nahezu in einer Ebene, so daß sie durch die Referenzebene mit Hilfe Fizeauscher Interferenzen aufeinander bezogen werden konnten. Dann wurde die Referenzebene auf die hintere Fläche des kürzeren Maßstabes verschoben und in dieser Lage festgehalten, dann der kürzere Maßstab selbst nachgeschoben, bis seine Vorderfläche wieder mit der Referenzebene zusammenfiel, endlich die Referenzebene auf die jetzt nahe wieder in einer Ebene liegenden hinteren Maßstabflächen eingestellt. Durch Fortsetzung dieses Verfahrens konnte Michelson zu immer größeren Längen hinaufsteigen; der letzte, der 10 cm-Maßstab wurde schließlich direkt komparatorisch an ein bekanntes Dezimeter-Strichmaß angeschlossen.

Bei den Michelsonschen Messungen wurden Interferenzen im reflektierten Licht benutzt. In ähnlicher Weise kann man auch im durchgehenden Lichte beobachten, ein Verfahren, das Benoit, Fabry und Perot bei einer Wiederholung der Ausmessung des Meters in Lichtwellenlängen (s. Abschnitt 2) tatsächlich eingeschlagen haben. Ihre Maßstäbe waren dementsprechend Luftplatten, die in der Weise hergestellt wurden, daß versilberte plane Glasplatten als Verschlußplatten auf einen röhrenförmigen Körper aus Invar (s. Abschnitt 3) gedrückt wurden; die einander zugekehrten Flächen der beiden Silberschichten bilden dann die planparallele Luftplatte, gleichsam einen Maßstab mit inneren Enden.

12. Ophthalmometer. Das Ophthalmometer dient dazu, kleine Strichentfernungen mit Hilfe des Mikroskopes oder Fernrohres zu messen. Seine Konstruktion beruht auf der Ueberlegung, daß ein Lichtstrahl, der eine planparallele Glasplatte anders wie in senkrechter Richtung durchsetzt, von seinem geraden Wege abgelenkt wird. Figur 16 zeigt einen solchen Lichtstrahl, der die Platte bei A unter dem Einfallswinkel α trifft und sie bei B zwar parallel zur Ein-

fallsrichtung aber um die Strecke ½ e verschoben verläßt. Das den austretenden Lichtstrahl beobachtende Auge sieht das Objekt nicht an seiner eigentlichen Stelle, sondern in der rückwärtigen — in der Figur punktiert bezeichneten — Verlängerung der Austrittsrichtung.

Das Ophthalmometer besteht nun aus zwei solchen gleichdicken Glasplatten AB, deren jede eine Hälfte des Fernrohr- oder Mikroskopobjektivs bedeckt. Beide Platten lassen sich um eine gemeinsame Achse gleichzeitig um gleiche Winkel, aber gegen einander drehen. Die Größe der Drehung wird an Teilkreisen abgelesen; in der Nullpunktsstellung liegen beide Platten in der zur Sehlinie senkrechten Ebene. Nach dem Vorhergehenden ist dann klar, daß man durch Betätigung des Drehungsmechanismus zwei Striche, die in der Entfernung e voneinander liegen, auf der punktierten Linie der Figur 16 zur Deckung bringen kann. Bezeichnet α den hierzu nötigen Drehungswinkel, von der Nullstellung aus gerechnet, a die Plattendicke und n den Brechungsexponenten des Plattenglases gegen Luft, so ist, wie sich durch eine einfache Ueberlegung auf geometrischem Wege ableiten läßt

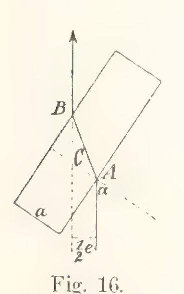


Fig. 16.

$$e = a\left(2\sin\alpha - \frac{\sin 2\alpha}{\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}}\right)$$

Statt die Konstanten a und n der Platten einzeln zu bestimmen, mag oft eine empirische Eichung des Instrumentes mit Hilfe einer bekannten Skale genügen.

Literatur. ***Grunmach,*** *Die physikalischen Erscheinungen und Kräfte, ihre Erkenntnis und Verwertung im praktischen Leben. Leipzig 1899. (Aeltere Maße).* — ***Guillaume,*** *La convention du mètre et le Bureau international des Poids et Mesures. Paris 1902.* — ***Derselbe,*** *Les récents progrès du système métrique. Proc. Verb. du Com. intern. (2)* **5** *21 S. 1909 u. (2)* **6** *53 S. 1911.* — ***Pulfrich,*** *Ueber das Abbe-Fizeausche Dilatometer. Zeitschr. f. Instrkde.* **13** *365, 401, 437 1903.* — ***Scheel,*** *Grundlagen der praktischen Metronomie Braunschweig 1911.* — ***Weinstein,*** *Physikalische Maßbestimmungen. Berlin 1886/88.* — *Ferner viele Abhandlungen in den Procès Verbaux und Travaux et Mémoires du Bureau international des Poids et Mesures, in den Wissenschaftlichen Abhandlungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt und denen der Kaiserl. Normal-Eichungs-Kommission.*

K. Scheel.

Langley

Samuel Pierpont.

Geboren am 22. August 1834 in Roxbury bei Boston; gestorben am 27. Februar 1906. Nachdem er kurze Zeit am Harvard College als Assistent gewirkt hatte, wurde er 1866 Professor der Mathematik an der U. S. Academy. 1867 Direktor des Allegheny Observatory in Pittsburg, 1887 Secretary of the Smithsonian Institution in Washington. Langley beschäftigte sich vorwiegend mit dem Problem des Fluges, 1893 konstruierte er die erste befriedigende Maschine, 1903 eine solche, die einen Menschen tragen konnte. Er führte in großem Maßstab die Zeitverteilung durch Sternwarten in Amerika ein. 1880 konstruierte er das erste Bolometer und entdeckte damit eine unerwartete Ausdehnung des Infrarot im Spektrum, 1883 gab er eine genaue Ausmessung der Strahlung im Spektrum.

E. Drude.

Laplace

Pierre Simon.

Geboren am 28. März 1749 in Beaumont-en-Auge (Departement Calvados); gestorben am 25. März 1827 in Paris, war Lehrer der Mathematik an der Militärschule in Beaumont, ging dann nach Paris und wurde Examinator am Königlichen Artilleriekorps, 1773 Mitglied der Akademie der Wissenschaften und später eins der ersten Mitglieder des Längenbureaus. Bonaparte ernannte ihn bei Beginn der Konsularregierung 1799 zum Minister des Innern, bald darauf zum Mitglied des Erhaltungssenats, im Juli 1803 zu dessen Vizepräsidenten, im September zu dessen Kanzler, bei Errichtung des Kaiserthrones 1804 erhob er ihn in den Grafenstand. Im September 1805 bewirkte Laplace die Abschaffung der revolutionären Zeitrechnung und die Wiedereinführung des gregorianischen Kalenders. Ludwig XVIII. ernannte ihn zum Pair, später zum Marquis. Fast alle Probleme der neueren Astronomie hat Laplace mit den Hilfsmitteln der Analysis bearbeitet. Er entdeckte die Gesetze in der Bewegung der Jupitermonde und bestimmte die gegenseitige Störung der Hauptplaneten.

Literatur. ***Kaufmann,*** *Laplace. Paris 1841.* — ***Fourier,*** *Éloge historique de Laplace lu à la séance de l'académie des sciences du 15 juin 1829.* — ***Rosenberger,*** *Geschichte der Physik, III, S. 50. Braunschweig 1887—1890.*

E. Drude.

Latente Wärme.

1. Allgemeines 2. Schmelz- und Erstarrungswärme. 3. Verdampfungs- und Kondensationswärme. Verdunstungskälte. 4. Umwandlungswärme. 5. Lösungswärme. 6. Verdünnungswärme. 7. Absorptionswärme. 8. Adsorptionswärme. 9. Wärmetönungen.

1. Allgemeines. Die Wärme ist eine Form der Energie und als solche einer

Arbeit äquivalent. Sie läßt sich in solche nach den Gesetzen der mechanischen Wärmetheorie umwandeln.

Führt man einem Körper eine gewisse Wärmemenge zu, so kann der Körper hierdurch auf zweierlei Weise beeinflußt werden. Im einen Falle bleibt die Wärme Wärme und gibt sich in der Form einer Temperaturerhöhung kund; hierüber gibt der Artikel „Kalorimetrie“ Auskunft.

Im anderen Falle wird die dem Körper zugeführte Wärmemenge durch das Thermometer nicht angezeigt. Die zugeführte Wärmemenge wird vielmehr zur Arbeitsleistung verbraucht, um in dem Körper oder in seinen Teilen molekulare Umlagerungen zu bewerkstelligen oder, wenn zwei oder mehrere Körper gleichzeitig vorhanden sind, Molekülverbände zu sprengen und neue Molekülverbände aus den Atomen aufzubauen. Soweit diese Veränderungen physikalischer Natur sind, nennt man die zur Herbeiführung der Veränderungen verbrauchte, scheinbar verschwundene Wärmemenge nach einer schon alten Gewohnheit latente Wärme; treten chemische Veränderungen auf, so pflegt man die hierzu nötigen Wärmemengen als Wärmetönungen zu bezeichnen. Hier interessiert wesentlich nur die latente Wärme, deren verschiedene Formen, unbeschadet einer ausführlicheren Behandlung an anderen Stellen dieses Handwörterbuches hier im Zusammenhange kurz besprochen werden sollen.

Die Vorgänge, bei denen latente Wärme verbraucht wird, sind vielfach umkehrbar. Man kann dann durch Messungen feststellen, daß bei dem umgekehrten Verlauf des Vorganges genau soviel latente Wärme frei wird, wie vorher aufgewendet wurde. Betrachten wir beispielsweise eine Aggregatzustandsänderung in beiden Richtungen, so muß zum Schmelzen von 1 kg Eis genau soviel Wärme aufgewendet werden, wie durch Verfestigung von 1 kg Wasser wiedergewonnen werden kann. Schmelzwärme und Erstarrungswärme haben also, absolut genommen, denselben Wert; sie unterscheiden sich voneinander lediglich durch das Vorzeichen. Die Messung bestätigt in diesem Falle nur das Gesetz von der Erhaltung der Energie. Denn da auch die Wärme eine Form der Energie ist, so müssen Gewinn und Verlust an dieser Energie sich aufheben, wenn der Körper wieder in seinen ursprünglichen Zustand zurückgekehrt ist.

Zur Messung der latenten Wärmen bedient man sich der allgemeinen kalorimetrischen Methoden (vgl. den Artikel „Kalorimetrie“); einzelne Beispiele werden weiter unten gegeben. Man hat dabei zu berücksichtigen, daß der zu messende Vorgang sich bei einer ganz bestimmten Temperatur vollzieht oder auf eine solche zu beziehen ist, und daß man, soweit diese Temperatur nicht genau innezuhalten ist, nach den Regeln der Kalorimetrie die anderweitig verbrauchten Wärmemengen zur Berichtigung des Resultates in Rechnung stellen muß. Wie man hier zu verfahren hat, wird aus der Beschreibung einer Bestimmung der Schmelz- oder Erstarrungswärme zu ersehen sein.

Die latenten Wärmen werden in der Physik fast ausschließlich in g-Kalorien für 1 g Substanz gerechnet; die Vertreter der physikalischen Chemie geben die latenten Wärmen dagegen vielfach in g-Kalorien für 1 Grammolekül an, d. h. für eine Masse des Körpers von einer Anzahl Gramm gleich seinem Molekulargewicht, auch wohl für 1 Grammatom.

2. Schmelz- und Erstarrungswärme. Wir denken uns eine bestimmte Menge trockenen Eises von tiefer Temperatur, etwa -20^0, der wir auf irgendeine Weise, durch Berühren mit wärmeren Körpern, durch Heizung mit der Flamme oder auf elektrischem Wege meßbare Wärmemengen zuführen. Das Eis erwärmt sich dann zunächst bis an seinen Schmelzpunkt bei 0^0; bei weiterer Wärmezufuhr tritt zunächst keine Temperaturerhöhung mehr ein, vielmehr sieht man, daß das Eisstück allmählich in Wasser zerfällt, daß es schmilzt. Die Forschung hat ergeben, daß zum Schmelzen von jedem Gramm Eis die große Menge von 80 g-Kal verbraucht wird, eine Wärmemenge, die genügen würde, um das gebildete Gramm Wasser von 0^0 auf 80^0 zu erwärmen. Die zum Schmelzen verbrauchte Wärme nennt man Schmelzwärme; die Schmelzwärme des Eises ist also gleich 80 g-Kal für 1 g Eis. Die Schmelzwärme ändert sich von Substanz zu Substanz innerhalb weiter Grenzen.

Zur Bestimmung der Schmelz- oder Erstarrungswärme bedient man sich der Mischungsmethode. Liegt der Schmelzpunkt τ der Substanz oberhalb der Kalorimetertemperatur, so erwärmt man eine Menge M g der nötigenfalls in ein Schutzröhrchen eingeschlossenen Substanz auf eine Temperatur t_1, die höher liegt als der Schmelzpunkt, befördert dann das Röhrchen mit der Substanz ins Kalorimeter und beobachtet dessen Temperaturerhöhung bis zur Erreichung einer konstanten Endtemperatur t_2. Seien c und c′ die spezifischen Wärmen der Substanz im flüssigen und festen Zustande, so werden von ihr in den verschiedenen Stadien folgende Wärmemengen (in Kalorien) an das Kalorimeter abgegeben, das der Einfachheit halber als Wasserkalorimeter gedacht sei:

a) während der Abkühlung von der Temperatur t_1 auf die Schmelztemperatur τ $Mc\,(t_1-\tau)$

b) während der Umwandlung der flüssigen Substanz in ihre feste Form bei der Temperatur τ $M\,\varrho$, wo ϱ die Erstarrungs- oder Schmelzwärme bedeutet

c) während der Abkühlung der festen Substanz von der Temperatur τ auf die Endtemperatur t_2 $Mc'\,(\tau-t_2)$

Das Kalorimeter, dessen Wasserwert W betrage, sei durch Zuführung dieser drei Wärmemengen von der Temperatur t auf t_2 gebracht, dann gilt, abgesehen von Korrektionsgrößen,

$$Mc\,(t_1-\tau) + M\,\varrho + Mc'\,(\tau-t_2) = W\,(t_2-t),$$

woraus sich die Erstarrungswärme ϱ leicht berechnen läßt. Die Methode setzt die Kenntnis der spezifischen Wärme c und c′ im flüssigen und festen Zustande voraus. Nötigenfalls müssen beide zuvor nach den im Artikel „Kalorimetrie“ gegebenen Regeln ermittelt werden. Statt des Mischungskalorimeters kann im vorliegenden Falle auch das Eiskalorimeter mit Erfolg zur Bestimmung der Erstarrungswärme benutzt werden.

Liegt der Schmelzpunkt eines Körpers sehr niedrig, so bringt man die Substanz in erstarrtem Zustande ins Kalorimeter und läßt sie darin schmelzen. Man findet dann statt der Erstarrungswärme die Schmelzwärme selbst.

Schmelz- und Erstarrungswärme haben nicht immer eindeutig bestimmte Werte. Das ist dann der Fall, wenn das Schmelzen einer Substanz nicht, wie beim Eise, bei einer scharf ausgeprägten Temperatur stattfindet, sondern wenn dem Schmelzvorgang eine Periode allmählicher Erweichung vorangeht, die manchmal ein sehr weites Temperaturgebiet umfaßt. Man würde den gesamten Vorgang dann nur durch Einführung einer Art latenter Erweichungswärme umfassen können, womit aber in der Regel nicht viel gewonnen ist. Substanzen, die das Erweichungsgebiet sehr deutlich zeigen, sind z. B. alle Glassorten, Wachs u. dgl.

3. Verdampfungs- und Kondensationswärme. Verdunstungskälte. Wie bei der Umwandlung von Eis in Wasser, wird auch bei der Umwandlung von Wasser in Wasserdampf beim Siedepunkt 100° eine beträchtliche Wärmemenge als latente Verdampfungswärme verbraucht. Die Verdampfungswärme des Wassers kann nach den besten Messungen zu 538 g-Kal für 1 g Wasser angegeben werden. Die Verdampfungswärme variiert im übrigen von Substanz zu Substanz gleichfalls beträchtlich. Diese Wärmeenergie wird einerseits zur Leistung mechanischer Arbeit verbraucht, die bei Vergrößerung des Wasservolumens auf mehr als das 1600fache des Dampfvolumens gegen den äußeren Druck aufgewendet werden muß. Der weitaus größere Teil der Verdampfungswärme des Wassers erhöht die innere Energie des Wasserdampfes; er dient u. a. dazu, die Entfernung der Wasserteilchen voneinander unter Ueberwindung der gegenseitigen Anziehungskräfte zu vergrößern.

Verdampfungs- und Kondensationswärme sind in demselben Sinne einander gleich, wie Schmelz- und Erstarrungswärme, wenn nämlich beide auf denselben Siedepunkt oder Kondensationspunkt bezogen sind. Bei dem hier zu betrachtenden Vorgang liegen die Verhältnisse aber insofern etwas anders wie beim Schmelzen, als die Verdampfung in der Form des Verdunstens schon bei Temperaturen vor sich gehen kann, die weit unterhalb des Siedepunktes liegen. Am bekanntesten ist hier die Wasserverdunstung auf der Erdoberfläche, die schon bei gewöhnlicher Temperatur erfolgt, und die eine große Rolle im Haushalt der Natur spielt, worüber im Artikel „Atmosphäre“ Näheres mitgeteilt ist.

Sehr bekannt zum Nachweis der Verdampfungswärme oder der Verdunstungskälte ist der einfache Versuch, sich den leicht flüchtigen Aethyläther (Schwefeläther) über die Hand auszugießen. Der Aether hat bei der großen ihm dargebotenen Oberfläche gegen die atmosphärische Luft das lebhafte Bestreben, zu verdunsten; hierzu bedarf er einer berechenbaren, in erster Linie von der verdunstenden Menge abhängigen Wärmemenge, die ihm die im menschlichen Körper aufgespeicherte Wärmeenergie liefert. Da die verbrauchte Wärme aus anderen Teilen des Körpers nicht genügend schnell nachgeliefert werden kann, so hat man an der Stelle, wo der Aether verdunstet, ein starkes Kältegefühl. Zur Auslösung des Kältegefühls bedarf es übrigens nicht eines so intensiv wirkenden Mittels wie Schwefeläther; bei einiger Uebung gelingt es schon, es durch Befeuchten eines Fingers mit Wasser hervorzurufen. Auch das Gefühl der Kälte, das man empfindet, wenn man aus einem überhitzten Raume in die freie Zugluft hinaustritt, beruht auf Wärmeentziehung durch verdunstende Feuchtigkeit.

Der Vorgang der Verdunstung wird häufig zur Erreichung einer mäßigen Temperaturerniedrigung benutzt. Es ist bekannt, daß zerstäubendes Wasser, eben wieder wegen der großen Berührungsfläche mit der umgebenden Luft, eine kühlende Wirkung ausübt, deren man sich zu heißer Sommerszeit zur Kühlung von Getränken u. dgl., wenn Eis nicht gerade zur Verfügung steht, gern

bedient. Zweckentsprechender ist es allerdings — ein Verfahren, das in südlichen Ländern beliebt ist — die zu kühlenden Speisen und Getränke in feuchte poröse Tongefäße zu bringen, und diese dann dem Winde auszusetzen. Das gleiche Mittel wendet vielfach die Natur selbst zur Kühlung unterirdischer Höhlen an. Bekannt sind die nur wenige Kilometer vom Rhein entfernten natürlichen Eiskeller von Niedermendig; die Kühlung liefert hier das poröse wassergetränkte Lavagestein der Eifel in Verbindung mit natürlichen Windlöchern, die der atmosphärischen Luft das Durchstreichen durch die Höhlen erlauben.

Wieweit die Abkühlung durch Verdunstung gehen kann, zeigt folgender Versuch: Unter dem Rezipienten einer Luftpumpe befindet sich ein Schälchen mit Wasser und ein zweites Schälchen mit konzentrierter Schwefelsäure. Evakuiert man den Rezipienten sehr stark, so setzt eine lebhafte Verdunstung des Wassers ein, indem im luftleeren Raum jeder neu gebildete Dampf gierig von der Schwefelsäure aufgenommen wird. Die Folge der schnellen Verdunstung ist eine so schnelle Abkühlung des Wassers, daß der auf dem Schälchen verbliebene Rest gefriert.

Noch weiter geht die Abkühlung, wenn man flüssige Kohlensäure, die sich in einer Stahlflasche unter dem Druck von etwa 100 Atmosphären befindet, durch Oeffnen des Ventils der Flasche entspannt. Auch hier tritt zufolge der ungeheuer schnellen Verdampfung ein großer Wärmebedarf ein, der nur durch die Kohlensäure selbst gedeckt werden kann. Die Kohlensäure kühlt sich dabei bis unter ihren Erstarrungspunkt (-78^0) ab und verläßt die Stahlflasche in schneeiger Konsistenz, so daß sie in kleinen Säckchen aufgefangen werden kann. Bis zur Darstellung der flüssigen Luft bot die so gewonnene feste Kohlensäure mit Aether oder Alkohol vermischt wohl das bequemste Mittel zur Erreichung tiefer Temperaturen.

Verdampfung und Kondensation benutzt man im praktischen Leben in umfangreichem Maße zu einem Prozeß, den man Destillation nennt und der bezweckt, entweder eine schon nahezu reine Substanz von ihren Verunreinigungen zu befreien, oder eine aus mehreren Bestandteilen von sehr verschiedenen Siedepunkten bestehende Substanz in ihre einzelnen Komponenten zu zerlegen (fraktionierte Destillation). Allen Formen gemeinsam ist die Verdampfung der zu behandelnden Flüssigkeit in einem Gefäße durch Zuführung von Wärmemengen mittels Brenner u. dgl., und die nachherige Kondensation, indem die vorher zur Verdampfung aufgewendete Wärmemenge dem Dampfe wieder entzogen wird. Zum Zwecke der Kondensation leitet man den Dampf durch ein längeres Glas- oder Metallrohr (Kühlrohr), das durch eine Kühlflüssigkeit, wenn angängig am bequemsten Wasserleitungswasser, dauernd auf einer Temperatur gehalten wird, die tiefer ist als der Siedepunkt der zu kondensierenden Flüssigkeit. Wird die Destillation nur zur Reinigung einer Flüssigkeit angewendet, so läßt man wohl den ersten Teil der Flüssigkeit, der vielleicht noch durch die nicht genügend saubere innere Oberfläche der Destillationsvorrichtung verunreinigt war, unbenutzt abfließen und verzichtet ebenso auf die Benutzung des letzten Restes, in dem die verunreinigenden Stoffe jetzt zu einem größeren Prozentsatz angehäuft sind als am Anfang. Bei der fraktionierten Destillation gehen im Anfang die leichter siedenden, zum Schluß die schwerer siedenden Bestandteile über. Handelt es sich nicht nur um die Trennung zweier Komponenten, wie etwa bei Alkohol-Wasser-Mischungen, sondern um die Trennung vieler Bestandteile, wie z. B. beim Rohpetroleum, so erhält man mit jedem Wechsel des Auffanggefäßes ein Produkt, dessen mittlerer Siedepunkt allmählich ansteigt.

Zur Messung der Verdampfungs- und Kondensationswärme dient wiederum das (Wasser-)Mischungskalorimeter. Je nachdem die Siedetemperatur der zu untersuchenden Substanz höher oder tiefer liegt als die Temperatur des Kalorimeters, leitet man den Dampf oder die Flüssigkeit durch ein schlangenförmig gebogenes Metallrohr mit verhältnismäßig großer Oberfläche durch das Kalorimeter, aus dem die Substanz als Flüssigkeit oder als Dampf austritt. Aus der Temperaturänderung des Kalorimeters und der Menge der dem Prozeß unterworfenen Substanz, die man meist durch Differenzwägung der Flüssigkeit ermittelt, findet man im ersten Falle die Kondensations-, im zweiten Falle die Verdampfungswärme.

Nach einer elektrischen Methode wird die Verdampfungswärme auf folgende Weise bestimmt. Eine gewogene Menge der zu untersuchenden Flüssigkeit befinde sich in einem vom Dampfe der gleichen Flüssigkeit umspülten Gefäße auf der Siedetemperatur. In der Flüssigkeit sei ein elektrischer Heizdraht vom Widerstand r Ohm angeordnet, durch den man z Sekunden lang einen Strom von i Ampère schicke. Nach Erkalten der ganzen Anordnung wird die Flüssigkeit abermals gewogen und die verdampfte Menge als Differenz der Wägungsresultate gleich M gefunden. Dann ist die Verdampfungswärme

$$\sigma = 0{,}239 \frac{i^2 r z}{M}$$

Das Verfahren ist zur Messung der Ver-

dampfungswärme von kondensierten Gasen angewendet worden; in diesem Falle bestimmt man M nicht als Wägungsdifferenz, sondern aus dem Volumen des verdampften Gases, das man zu diesem Zwecke in einem Gasometer auffängt.

4. **Umwandlungswärme.** Es kommt bisweilen vor, daß Körper, Elemente sowohl als auch chemische Verbindungen, in verschiedenen Modifikationen existieren können. Die Umwandlungen, die in der Regel bei bestimmten Temperaturen vor sich gehen, nennt man allotrope oder polymorphe. Die Umwandlung vollzieht sich unter Beibehaltung der chemischen Zusammensetzung nur in der Weise, daß die Körper ihre physikalischen Eigenschaften und ihre kristallinischen Eigenschaften ändern. Einer der bekanntesten derartigen Körper ist der Schwefel, der bei 95,6° aus der rhombischen in die monoklinische Form übergeht, ferner Ammoniumnitrat mit drei Umwandlungspunkten (32° 83° 126°), weiter Quecksilberjodid, Jodsilber, Phenol, Jodmethylen u. a. m. Es hat sich nun gezeigt, daß mit jeder solcher Umwandlung die Aufnahme oder Abgabe einer latenten Umwandlungswärme verknüpft ist. So werden bei der Umwandlung des Schwefels für 1 g Substanz 2,5 g-Kal absorbiert, bei Ammoniumnitrat an den drei Umwandlungspunkten 5,0 5,3 11,9 Kal. Daß auch diese aufgenommenen Wärmemengen zur Verrichtung von Arbeitsleistung verwendet werden, ist ohne weiteres einleuchtend. Meist werden sie für die kristallinische Umlagerung verbraucht werden.

Man beobachtet im physikalischen Verhalten der Körper noch andere Unstetigkeiten, die ebenfalls auf Umwandlungen zurückgeführt werden müssen. Am bekanntesten sind in dieser Hinsicht wohl die Erscheinungen beim Eisen, Stahl, Nickel usw., die augenfällig werden, wenn man deren magnetische Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur darstellt. Die Magnetisierungskurve zeigt in allen Fällen deutliche Knicke, die stets bei der gleichen Temperatur wieder auftreten und beim Erwärmen und beim Abkühlen vielfach auf die gleichen Stellen fallen. Man hat durch gleichzeitige kalorimetrische Untersuchung der Probestücke auch eine Aenderung des Wärmeeinflusses an den Umwandlungspunkten tatsächlich feststellen können. Indessen hat noch nicht sicher entschieden werden können, ob auch hier eine latente Umwandlungswärme in Frage kommt, oder ob sich nicht vielmehr nur die Werte der spezifischen Wärme des Materials von einem zum anderen Zweig der Magnetisierungskurve unstetig ändern.

5. **Lösungswärme.** Bei der Lösung eines Körpers in einem anderen wird immer eine gewisse Wärmemenge in Bewegung gesetzt, die von Lösungsmittel zu Lösungsmittel, wie auch für jeden gelösten Körper verschieden ist. Die Lösungswärme kann positiv oder negativ sein, d. h. sie kann bei dem Lösungsvorgang in Freiheit gesetzt oder auch gebunden werden. Die absoluten Werte der Lösungswärme sind sehr verschieden.

Da es für die Größe der bei der Lösung entwickelten Wärmemenge nicht gleichgültig ist, ob man die zu lösende Substanzmenge dem reinen Lösungsmittel, etwa Wasser, zusetzt, oder einem Lösungsmittel, in dem sich bereits etwas von der zu lösenden Substanz befand, oder mit anderen Worten, da die beim Lösen entwickelte Wärmemenge nicht der angewendeten Substanzmenge proportional ist, so kann man den Begriff der Lösungswärme sehr verschieden definieren. Gebräuchlich sind folgende Festsetzungen:

1. Lösungswärme ist die Wärmemenge, die frei oder verbraucht wird, wenn man 1 g Substanz in M g reinen Lösungsmittels (Wassers) auflöst;
2. Lösungswärme für große Verdünnung, auch Grenzwert der Lösungswärme, ist die Wärmemenge, die frei oder verbraucht wird, wenn man 1 g Substanz in einer sehr großen Menge Substanz löst; die Definition 1 geht in 2 über für $M = \infty$:
3. Letzte Lösungswärme ist die Wärmemenge, die frei oder verbraucht wird, wenn man der fast gesättigten Lösung noch ein wenig Substanz bis zur völligen Sättigung zufügt, bezogen auf 1 g Substanz. Man findet die letzte Lösungswärme als Grenzfall dadurch, daß man die Lösungswärme für verschiedene Mengen der Substanz in derselben Menge Lösungsmittel bestimmt. Die letzte Lösungswärme hat theoretisch das größte Interesse.

Zur Messung der Lösungswärme benutzt Nernst ein aus zwei ineinandergesetzten Bechergläsern bestehendes Mischungskalorimeter oder statt dessen auch ein versilbertes Vakuummantelgefäß, dessen Wasserwert aus der beobachteten Wärmetönung einer schon bekannten chemischen Reaktion abgeleitet wird; die Reaktion wird in einem Probierglas ausgeführt, das durch den Deckel in das Kalorimeter hineinragt. Bei Messung der Lösungswärme bringt man den zu lösenden Körper, möglichst fein gepulvert, um die Zeitdauer des Vorganges abzukürzen und damit die Wärmeverluste klein zu machen, in das Probierglas und durchstößt nach erfolgtem Temperaturausgleich dessen Boden, so daß der zu lösende Körper ins Kalorimeter fällt.

Wir wollen jetzt noch den besonderen

Fall betrachten, daß man ein Salz, Kochsalz oder dgl. in Wasser löst; bei Lösung anderer Körper auch in anderen Flüssigkeiten treten ähnliche Erscheinungen ein. Hierbei wird im allgemeinen ein Wärmeverbrauch beobachtet. Wird die nötige Wärmemenge nicht von außen zugeführt, so wird sie — ein ähnlicher Vorgang wie bei der Verdunstungskälte — der Lösung selbst entzogen und in demselben Maße, wie das geschieht, muß ein Teil der Lösung erstarren. Tatsächlich erstarrt nun nicht die Lösung als Ganzes, sondern nur der wässerige Bestandteil. Hierdurch wird der Rest der Lösung konzentrierter, sein Erstarrungspunkt sinkt infolgedessen, es wird eine weitere Eismenge bei tieferer Temperatur ausgeschieden, die Lösung wird dadurch wieder konzentrierter usw. Das dauert, sofern die Ausgangstemperatur genügend niedrig war, bis zur Sättigung der Lösung und bis ein mechanisches Gemisch von Eis und Salz in dem Verhältnis entstanden ist, wie beide Bestandteile in der Lösung vorhanden sind. Die Lösung hat in diesem Zustande eine konstante Temperatur, die gleichzeitig die mit Eis und dem betreffenden Salz überhaupt erreichbare tiefste Temperatur ist. Daß die erreichte tiefe Temperatur für eine längere oder kürzere Zeit, d. h. solange die Temperatur der ganzen Masse noch hinreichend tief ist, konstant bleiben muß, sieht man leicht ein. Denn wird etwa durch Zuführung von Wärme von außen her die Temperatur der Mischung erhöht, so bleibt die gebildete Lösung nicht mehr gesättigt; sie kann also wieder Salz aufnehmen und dadurch ihre Temperatur auf den früheren tiefsten Stand erniedrigen.

Man bezeichnet solche Lösungen, für die man in der Regel Schnee oder feingestoßenes Eis an Stelle des Wassers verwendet, als K ä l t e m i s c h u n g e n. Ihre Verwendung ist dort, wo es sich um Herstellung konstanter tiefer Temperaturbäder oder um Erzeugung einer mäßigen Kälte im kleinen handelt, sehr bequem; bis zur Entwicklung der modernen Kälteerzeugung bildeten die hier behandelten Lösungen überhaupt das einzige Mittel der Kältebereitung.

Die erreichte Konstanz der Mischungstemperatur ist je nach den verwendeten Salzen mehr oder weniger vollkommen. Die Temperaturerniedrigung kann gleichfalls sehr verschiedene Werte haben. So liefert Schnee oder feingestoßenes Eis mit

Kaliumnitrat	— 2,8°
Magnesiumsulfat . . .	— 4 bis —5°
Baryumchlorid	— 7,3°
Ammoniumnitrat . . .	— 8,5 bis —9,5°
Ammoniumchlorid . . .	— 15,2°
Natriumchlorid	— 21°
Chlorcalcium unterhalb	— 50°

6. Verdünnungswärme. Die Abhängigkeit der Lösungswärme von der bereits vorhandenen Konzentration bedingt das Auftreten einer besonderen Verdünnungswärme, wenn man zu einer schon vorhandenen Lösung reines Lösungsmittel hinzufügt oder verschieden konzentrierte Lösungen miteinander mischt. Die Verdünnungswärme kann positiv oder negativ sein; zwischen ihr und den verschieden definierten Lösungswärmen bestehen nahe, durch Formeln ausdrückbare Zusammenhänge, auf die hier aber nicht eingegangen werden soll. Die Bestimmung der Verdünnungswärme bietet keine Schwierigkeit; sie geschieht ähnlich wie die der Lösungswärme (vgl. auch den Artikel „L ö s u n g e n").

7. Absorptionswärme. Wie bei der Lösung fester Körper in Flüssigkeiten, so tritt auch bei der Lösung von Gasen in Wasser, der sogenannten Absorption, eine Befreiung oder Bindung von Wärme ein, die aber im allgemeinen schon deswegen nicht groß ist, weil die Flüssigkeiten meist nur geringe Gasmengen aufzunehmen vermögen. Man bestimmt die Absorptionswärme wiederum nach einer Mischungsmethode, indem man das Gas durch ein Rohr in die in einem Glaskolben enthaltene absorbierende Flüssigkeit leitet und die Temperaturzu- oder -abnahme mit einem Thermometer mißt. Dabei kann die absorbierende Flüssigkeit entweder selbst als Kalorimeterflüssigkeit dienen, oder der sie enthaltende Kolben wird in ein Wasserkalorimeter eingesetzt. Die absorbierte Gasmenge wird durch Volumenmessung oder durch Wägung des Kolbens vor und nach dem Versuch oder auch durch chemische Analyse bestimmt (vgl. auch den Artikel „A b s o r p t i o n").

8. Adsorptionswärme. Mit dem Namen Adsorption bezeichnet man Lösungserscheinungen in der Oberfläche, und zwar können sowohl Flüssigkeiten und ihre Dämpfe als auch Gase in dieser Weise von festen Körpern aufgenommen werden. Die adsorbierten Mengen sind von der Größe der adsorbierenden Flächen und von der Größe des Druckes abhängig, der die Erscheinung begleitet; es handelt sich also um wohldefinierte Gleichgewichtszustände. In allen Fällen ist der Vorgang der Adsorption von einer Wärmeentwicklung begleitet, deren Betrag man die Adsorptionswärme nennt.

Als Beispiel für die Adsorption einer Flüssigkeit wird im allgemeinen die Aufnahme einer Jodlösung oder ihres Dampfes durch pulverisierte Holzkohle angegeben. Bekannt ist aber auch die Adsorption von Wasserdampf durch Metall-, namentlich aber auch durch Glasoberflächen, eine Erscheinung, die z. B. bei der Messung kleiner Drucke mittels des M a c L e o d schen Manometers eine das Resultat fehlerhaft

beeinflussende Rolle spielen kann. Der Nachweis der Adsorptionswärme ist mitunter recht schwer und gelingt nur mit Hilfe empfindlicher Temperaturmeßinstrumente. In Kalorien ist der Betrag dieser Adsorptionswärme nur schwer angebbar.

Günstiger liegen die Verhältnisse bei einer anderen Erscheinung der Adsorption, nämlich der Adsorption oder auch Okklusion von Gasen auf der Oberfläche fester Körper. Hat die okkludierende Oberfläche eine sehr feine Verteilung, so daß das Verhältnis von Oberfläche zu Masse sehr groß ist, so kann die Wärmeentwicklung recht beträchtliche Werte annehmen. Beispielsweise kann Platin in feiner Verteilung als Platinmohr oder Platinschwamm, noch mehr Palladium große Gasmengen aufnehmen. Ist das adsorbierte Gas brennbar, wie z. B. Wasserstoff, so kann die entwickelte Wärmemenge zur Entzündung des Gases Veranlassung geben. Ein klassischer Zeuge für das Auftreten dieser Adsorptionswärme ist das früher viel gebrauchte, jetzt fast vergessene Döbereinersche Feuerzeug, das dadurch entzündet wurde, daß man Wasserstoff gegen Platinschwamm strömen ließ; in neuerer Zeit macht man von der Adsorptionswärme einen umfangreichen Gebrauch in den unter den verschiedensten Formen in den Handel kommenden Gasselbstzündern (vgl. auch den Artikel „Adsorption“).

9. **Wärmetönungen.** Es mag zum Schluß ein flüchtiger Blick auf die Fälle von Wärmebindung oder -entbindung geworfen werden, die chemische Prozesse begleiten. Das Wasser spielt in der Chemie insofern eine besondere Rolle, als es sich mit Stoffen der verschiedensten Art, z. B. mit vielen anorganischen Salzen als Ganzes, ohne Abscheidung eines seiner beiden Bestandteile verbinden kann. Man nennt solche Verbindungen Hydrate; die Hydratisierung erfolgt meist nur in einem Verhältnis, manchmal aber, wie z. B. beim Calciumsulfat in mehreren Stufen. Die Verbindung des wasserfreien Salzes mit einem oder mehreren H_2O oder der Eintritt einer weiteren Hydratationsstufe und umgekehrt der Zerfall in Wasser und das wasserfreie Salz gibt eine Wärmetönung, die Hydratationswärme, deren Bestimmung und Registrierung Aufgabe der physikalischen Chemie ist.

Als Bildungswärme bezeichnet man die Wärmetönung, die beim Zusammentritt aufeinander reagierender Stoffe zu einer chemischen Verbindung beobachtet wird. In dem speziellen Falle, daß der eine der reagierenden Körper Sauerstoff ist, die Verbindung also durch eine Verbrennung zustande kommt, spricht man von Verbrennungswärme. Wie bei der Bildung einer chemischen Verbindung wird auch bei ihrem Zerfall Wärme erzeugt oder verbraucht, die Dissoziationswärme. Je nach der Art des Zerfalles unterscheidet man die elektrolytische und die thermische Dissoziationswärme, von denen diese an die Erreichung bestimmter, unter Umständen sehr hoher Temperaturen geknüpft ist.

Neutralisationswärme endlich nennt man die Wärmetönung, die bei der Einwirkung einer Säure und einer Base aufeinander beobachtet wird.

Die bei chemischen Reaktionen auftretenden Wärmetönungen werden in der Regel mit Hilfe des Mischungs-(Wasser-) Kalorimeters bestimmt; die Reaktion wird in einer geschlossenen Reaktionskammer vorbereitet, die die in die Reaktion eintretenden Körper, nötigenfalls in Glasfläschchen u. dgl. getrennt, enthält, und nach eingetretenem Temperaturgleichgewicht durch Zertrümmerung der Glasfläschchen oder auch mit Hilfe des elektrischen Funkens eingeleitet. Vielfach sind diese Reaktionen mit starken Druckänderungen verknüpft, z. B. bei Explosionsversuchen; die Reaktionskammer oder, wie man sie in diesem Falle auch wohl nennt, die kalorimetrische Bombe, muß dann entsprechend kräftig gebaut sein. Da sie infolgedessen zu ihrer eigenen Erwärmung viel Wärme verschluckt, muß ihr Wasserwert genügend genau bekannt sein; man bestimmt ihn durch Ausführung einer Reaktion von bekannter Wärmetönung oder auch, indem man im Innern der Bombe auf elektrischem Wege eine berechenbare Wärmemenge erzeugt (vgl. hierzu auch den Artikel „Thermochemie“).

Literatur. *Die verschiedenen Kompendien der Physik.* **Müller-Pouillet**, *Braunschweig.* — **Wüllner**, *Leipzig.* — **Winkelmann**, *Leipzig.* — **Chwolson**, *Braunschweig.* — **Kohlrausch**, *Praktische Physik. Leipzig.* — *Ferner die Kompendien der physikalischen Chemie, z. B.* **Nernst**, *Theoretische Chemie, Stuttgart.* — *Von Spezialwerken* **Thomsen**, *Thermochemische Untersuchungen. Leipzig.* — **Berthelot**, *Thermochemische Messungen. Leipzig.* — **Planck**, *Thermochemie.*

K. Scheel.

Lateralsekretion.

Die Ausfüllung der Spalten der Erdrinde durch Stoffe, die aus dem Nebengestein ausgelaugt sind. Verwendet zur Erklärung der Erzgänge (vgl. den Artikel „Erzlagerstätten“).

Laterit.

Ein ziegelrotes Verwitterungsprodukt der Eruptivgesteine in den Tropen. Besteht hauptsächlich aus Tonerdehydrat und Eisenoxyd (vgl. den Artikel „Meteorwasser").

Laurent

Auguste.

Geboren am 14. November 1807 in La Folie bei Langres; gestorben am 15. April 1853 zu Paris. Er studierte das Bergfach, wurde Assistent an der École centrale des arts et manufactures, Chemiker an der Porzellanfabrik in Sèvres, später in Luxemburg, war von 1838 bis 1846 Professor der Chemie an der Faculté des sciences in Bordeaux, kehrte dann nach Paris zurück und wurde 1848 Wardein an der französischen Münze. Seine Experimentalarbeiten gehörten wesentlich der organischen Chemie an und erfuhren manche scharfe Kritik, da sie nicht immer durch Genauigkeit ausgezeichnet waren. Seine Ideen über Substitution, in seiner Kerntheorie gipfelnd, haben später, vereint mit denen Gerhardts über die organischen Reste und die Typen, sehr starken Einfluß auf die Entwickelung der organischen Chemie geübt. Besonders hat Laurent, und neben ihm Gerhardt, den Avogadroschen Satz von der Proportionalität der Gasdichten zu den Molekulargewichten der Vergessenheit entrissen und wieder in die Chemie eingeführt. Sein großes Verdienst liegt also vorwiegend im Bereiche der theoretischen Chemie. Die meisten Abhandlungen veröffentlichte Laurent in den Annales de Chimie et de Physique. Sehr wichtig für die Beurteilung seiner Arbeiten sind die mit Ch. Gerhardt 1845 bis 1848 veröffentlichten Comptes rendus mensuels des travaux chimiques etc.

E. von Meyer.

Lava.

Die aus Vulkanen ausfließende feurigflüssige Gesteinsmasse (siehe den Artikel „Vulkanismus").

Lavoisier

Antoine Laurent.

Geboren am 26. August 1743 als Sohn eines angesehenen Pariser Advokaten, erhielt eine vorzügliche Ausbildung, besonders in der Mathematik und in den Naturwissenschaften, so daß er schon in jungen Jahren durch eigene Experimentaluntersuchungen zu hohem Ansehen gelangte. Vielfach für das Wohl seines Vaterlandes tätig, geriet er in den Strudel der Revolution, welche ihn zur Zeit der Schreckensherrschaft Robespierres mitten aus seinen erfolgreichen Arbeiten herausriß. Als einer der Generalpächter, unter denen manche sich gewissenlos bereichert und dadurch den Haß des Volkes auf sich gezogen hatten, wurde Lavoisier am 8. Mai 1794 hingerichtet.

Lavoisiers wissenschaftliche Untersuchungen haben auf die Entwickelung der Chemie größten Einfluß ausgeübt. Als er zuerst an die Oeffentlichkeit trat, wurden die Vorgänge der Verbrennung, zu denen man schon damals die der Oxydation von Metallen und der Atmung zählte, irrtümlich gedeutet als verbunden mit dem Entweichen eines Brennstoffes, Phlogiston. Auf Grund der Versuche von Scheele und Priestley, die den Sauerstoff entdeckten, sowie von Cavendish, der die Zusammensetzung des Wassers kennen lehrte, konnte Lavoisier frei von phlogistischen Vorurteilen die Lehre der Oxydation aufstellen und siegreich durchführen, die seither in ihren Grundzügen in Geltung geblieben ist. Durch klare Erfassung der bisher mißdeuteten chemischen Vorgänge wurde er zum Reformator der Chemie.

Während Lavoisier in experimenteller Hinsicht auf den Schultern anderer stand, zeigte er sich als schöpferischer Geist in physikalisch-chemischen Untersuchungen, bei denen er die feine Wage zu dem unentbehrlichen Werkzeug erhob, welches sie bis heute geblieben ist. Mit klarem Blick erkannte er den Lehrsatz von der Erhaltung des Stoffes und wandte ihn auf chemische Vorgänge an. Seine Arbeiten über spezifische Wärme von Stoffen, über die Schmelzwärme des Eises, lassen schon fast moderne Ansichten über die Natur der Wärme erkennen. Lavoisier hatte hier zu Mitarbeitern ausgezeichnete Physiker und Mathematiker, einen Laplace, Lagrange und Monge. Bei der Durchführung seines neuen Systems wirkten seit dem Jahre 1786 Berthollet, Fourcroy und Guyton de Morveau mit Lavoisier zusammen, der selbst in seinem 1789 erschienenen Traité de Chimie das erste wahrhaft klassische Lehrbuch der antiphlogistischen Chemie schuf. Die darin versuchte Einteilung der Elemente und die Bezeichnungen der chemischen Verbindungen blieben lange vorbildlich. Lavoisier erlebte das siegreiche Vordringen seiner Lehre auch bei vielen Chemikern anderer Länder, obgleich manche noch lange Zeit an phlogistischen Ansichten festhielten.

Seine gesammelten Werke sind erst in neuerer Zeit, seit 1862, in 6 Bänden erschienen und lassen seine ungewöhnliche Vielseitigkeit erkennen. Die von französischen Chemikern, besonders Dumas und E. Grimaux über Lavoisier gefällten Urteile sind als höchst einseitig zu bezeichnen.

E. von Meyer.

Leben.

1. Vorläufige kurze Definition von „Leben". 2. Allgemeine Charakteristik des lebendigen Systems. Unterschied von nichtlebendigen Systemen: a) Unterschied zwischen toten organismischen Systemen und anorganismischen Systemen. b) Unterschied zwischen lebendigem und totem

organismischem System. 3. Die für das Leben charakteristischen Vorgänge im lebendigen System und ihre Bedingungen. a) Die charakteristischen physischen Prozesse des lebendigen Systems: α) Das aktuelle Leben und seine Bedingungen: αα) Die stationären Lebensprozesse (Prozesse des „ruhenden" lebendigen Systems). ββ) Die physiologischen Schwankungen der stationären Prozesse. γγ) Die fortschreitenden Aenderungen des lebendigen Systems (Entwickelung). β) Das latente Leben und seine Bedingungen. γ) Das Sterben und seine Bedingungen. b) Die physischen Eigenschaften des lebendigen Systems. 4. Zur Erklärung der Lebenserscheinungen. Theorie und Wesen des Lebens: a) Monistische Erklärungsversuche: α) Aehnlichkeit einzelner Lebenserscheinungen mit Erscheinungen anorganismischer Systeme. „Nachahmung" von Lebenserscheinungen. β) Prinzipielle Begründung der Berechtigung monistischer Erklärungen. γ) Erklärungsversuche der wichtigsten Gruppen von Lebenserscheinungen. b) Vitalistische Erklärungsversuche und ihre Kritik.

1. Vorläufige kurze Definition von Leben. Als „Leben"[1]) bezeichnen wir die Gesamtheit der Prozesse (Vorgänge, Aenderungen), die in einem „lebendigen Organismus" und zwar im einzelligen und im vielzelligen, sowie in gewissen Teilen des letztgenannten, nämlich seinen einzelnen Zellen, Geweben und Organen oder ganz allgemein in lebendigen Systemen (ihre Charakteristik siehe S. 67f.) stattfinden; diese Prozesse sind dadurch charakterisiert, daß sie „stationär" (Näheres siehe S. 72) im physikalisch-chemischen Sinne sind, im höchsten Maße die Fähigkeit besitzen, sich selbst zu erhalten, und die Fähigkeit, sich fortschreitend zu verändern (ontogenetische und phylogenetische Entwickelung).

Was wir an einem lebendigen System an charakteristischen Tatsachen feststellen können, nennt man gewöhnlich „Lebenserscheinungen". Und zwar unterscheidet man hier im allgemeinen „physische" Erscheinungen, d. h. die morphologischen, chemischen und physikalisch-energetischen und „psychische" Erscheinungen. Die „physischen" (körperlichen, materiellen) Lebenserscheinungen zerfallen dann ferner nach einem anderen Gesichtspunkt noch in zwei Gruppen, indem man einerseits die chemische, physikalisch-energetische und morphologische Beschaffenheit (Zusammensetzung, Aufbau), andererseits die Aenderungen dieser Beschaffenheit oder Vorgänge (Prozesse, Erscheinungswechsel) unterscheidet.

Die tatsächlich feststellbaren Lebenserscheinungen sind meist lückenhaft und zusammenhangslos (siehe S. 82), und werden bei ihrer wissenschaftlichen Erklärung durch geeignete hypothetische Bindeglieder (siehe S. 82) verknüpft, wodurch man zur Vorstellung des Zusammenhangs der Erscheinungen gelangt, des Zusammenhangs im Aufbau des lebendigen Systems und des Zusammenhangs der Prozesse oder Vorgänge im lebendigen System d. h. des lebendigen Gesamtprozesses.

Wir wollen uns nun zu der Frage wenden: Wodurch sind die „lebendigen Systeme" charakterisiert, wie unterscheiden sie sich von allen anderen, nämlich den „nicht-lebendigen" Systemen?

2. Allgemeine Charakteristik des lebendigen Systems. Unterschied von nicht-lebendigen Systemen. Zu den „nicht-lebendigen" Systemen gehört einerseits alles, was nicht Organismus ist oder kurz alles „Anorganismische" oder alle „anorganismischen Systeme"; andererseits alle toten, abgestorbenen Organismen (Leichen) und ihre Teile, kurz alle toten „organismischen Systeme". Um das „lebendige System" zu charakterisieren, ist es am zweckmäßigsten, zuerst den Unterschied zwischen toten organismischen Systemen und anorganismischen Systemen und dann den Unterschied zwischen lebendigem organismischem System (lebendigem System) und totem organismischem System zu behandeln.

2a) Unterschied zwischen toten organismischen Systemen (toten Organismen) und anorganismischen Systemen (Nicht-Organismen). Dieser Unterschied erscheint groß und deutlich, wenn man ein relativ einfaches anorganisches System wie einen Stein, Kristall, Flüssigkeitstropfen usw. mit einem toten „höheren" Organismus („höherem" Tier, Mensch, „höherer" Pflanze) vergleicht.

Hier finden wir zunächst eigenartige morphologische Unterschiede. Für jedes derartige organismische System ist es nämlich charakteristisch, daß es aus ganz bestimmt geformten Bausteinen, den Zellen, und ihren Derivaten und Produkten besteht. Die Zelle ist meist aus zwei bestimmt gebauten, gegeneinander abgegrenzten Stoffkomplexen, nämlich dem „Protoplasma" und „Zellkern" zusammengesetzt. Die Zellen können schon einzeln, als einzellige Organismen (Protisten, also Protozoen und Protophyten) recht komplizierte Formen zeigen, während durch die Zusammenlagerung von Zellen bei den mehrzel-

[1]) Die Behandlung des Gegenstandes folgt da, wo sie von bekannten und zitierten Darstellungen abweicht, den vom Verfasser seit mehr als zehn Jahren gehaltenen Vorlesungen über „Allgemeine Physiologie". Sonst findet man über das, worüber keine Literaturangabe gemacht ist, Näheres (nebst Literatur) in M. Verworn, Allgemeine Physiologie. 5. Auflage, Jena 1909.

ligen Organismen (Metazoen und Metaphyten) die kompliziertesten eigenartigsten Formgebilde zustandekommen; man denke nur an den menschlichen Körper. Diese morphologischen Eigentümlichkeiten sind verbunden mit entsprechend komplizierten physikalischen Verhältnissen, die in dieser Art bei anorganismischen Systemen nicht auftreten. Physikalisch gesprochen kann man diese Eigentümlichkeiten organismischer Systeme als besondere „Systembedingungen" (Näheres siehe S. 71) betrachten.

Endlich kommen hierzu noch besondere chemische Eigenschaften der organismischen Systeme. Diese bestehen darin, daß schon in jeder Zelle ein sehr mannigfach zusammengesetztes chemisches System enthalten ist, und dieses ist stets ausgezeichnet durch sehr komplizierte organische Verbindungen wie verschiedene Proteinsubstanzen, Kohlehydrate, Fette, Phosphatide usw. Diese werden in der Natur (siehe S. 73 f.) nur durch organismische und zwar nur durch lebendige Systeme erzeugt, finden sich hier also nur in solchen oder stammen von solchen her.

Man hat die Frage aufgeworfen, ob mit dem eben Angeführten ein prinzipieller Unterschied zwischen (toten) Organismen und anorganismischen Systemen gegeben sei. Auf diese Frage wollen wir nachher eingehen.

Zunächst haben wir jetzt noch darauf hinzuweisen, daß der oben charakterisierte Unterschied zwischen den beiden Arten von Systemen sehr viel geringer wird, wenn wir tote niedere Organismen zum Vergleich heranziehen, wie die einfachsten Bakterien, Algen usw. (zur näheren Orientierung siehe z. B. W. Kruse Allgemeine Mikrobiologie Leipzig 1910). Hier können die erkennbaren morphologischen Unterschiede gegen anorganismische Systeme so gering werden, daß es unter Umständen selbst für den Fachmann schwierig wird zu unterscheiden, ob er es mit einem organismischen oder anorganismischen System (etwa einem kleinen Kristall, Körnchen oder Tröpfchen) zu tun hat. In solchen Fällen sind dann auch besondere physikalische Unterschiede nicht zu erkennen. Es bleibt nun nur ein gewisser chemischer Unterschied, den wir noch etwas näher betrachten wollen.

Die chemische Analyse der verschiedensten organismischen Systeme hat ergeben, daß diese im allgemeinen aus Proteinsubstanzen, Kohlehydraten, Fetten, Phosphatiden, ferner aus gewissen Umwandlungs- und Zersetzungsprodukten dieser Stoffarten und endlich aus anorganischen Salzen und Wasser bestehen. Von den Umwandlungsprodukten seien noch besonders die zum Teil vielleicht den Eiweißkörpern nahestehenden, durch ihre eigenartigen Wirkungen ausgezeichneten Enzyme angeführt; von diesen ist es für manche in den Zellen selbst vorkommenden nachgewiesen, daß sie auch im toten organismischen System noch vorhanden sind, wie sich ja auch in den Körperflüssigkeiten und Sekreten, auch wenn sie aus dem Körper herausgenommen sind, Enzyme finden, z. B. die Katalase des Blutes und die Enzyme der Verdauungssäfte. Hier wären vielleicht auch noch die Antikörper und Hormone zu erwähnen, die aber wohl nicht in allen organismischen Systemen vorkommen (über alle diese Stoffe siehe auch S. 74 f.).

Es sei bei dieser Gelegenheit bemerkt, daß das eben Angeführte gewöhnlich als die chemische Zusammensetzung des Organismus schlechthin angegeben wird. Man darf aber nicht übersehen, daß wir es in diesen Fällen stets nur mit der Zusammensetzung des toten organismischen Systems zu tun haben. Denn nach den üblichen chemisch-analytischen Methoden können wir das organismische System nur in der Weise chemisch untersuchen, daß wir es möglichst schonend in seine Bestandteile zerlegen, also das lebendige System abtöten.

Hinsichtlich der chemischen Beschaffenheit des toten organismischen Systems ist endlich noch hinzuzufügen, daß in den Zellen (vgl. S. 65), wo Kernsubstanz und Protoplasma gegeneinander abgegrenzt sind, die genannten chemischen Verbindungen in bestimmter Weise auf Kern und Protoplasma verteilt sind.

Kehren wir jetzt wieder zur Frage zurück, ob ein prinzipieller Unterschied zwischen den eben chemisch charakterisierten einfachsten toten organismischen Systemen und anorganismischen Systemen vorhanden sei. Dieser könnte nach dem oben Dargelegten nur etwa ein chemischer sein. Ein solcher ist aber bei genauer Prüfung nicht zu erkennen. Denn die für das tote organismische System charakteristischen chemischen Bausteine lassen sich zum Teil jetzt schon künstlich, außerhalb des lebendigen Systems, herstellen, wie Kohlehydrate, Fette und auch komplizierte Hormone, etwa das Adrenalin; teils ist man der künstlichen Herstellung nahe gekommen, wie der der Eiweißkörper (vgl. Emil Fischer, Untersuchungen über Aminosäuren, Polypeptide und Proteine, Berlin 1906) durch die künstliche Synthese der Polypeptide, so daß der Aufbau richtiger Eiweißkörper außerhalb des lebendigen Systems nur noch eine Frage der Zeit ist; und ähnliches gilt für die Phosphatide. Am fernsten sind uns wohl noch die verschiedenen Enzyme (vgl. S. 74f.) und Antikörper; doch können wir auch mit diesen keine prinzipielle Scheidewand zwischen organismischen und anorganismischen Systemen auf-

richten, da auch in den letzteren ähnlich sich verhaltende Körper vorkommen. Unter solchen Umständen wäre es daher möglich, anorganismische Systeme aufzubauen, die keinen wesentlichen chemischen Unterschied und damit überhaupt keinen wesentlichen Unterschied gegen einfache tote organismische Systeme darbieten. Aber auch wenn die synthetische Chemie noch nicht so weit wäre, so könnten wir doch keinen anderen Standpunkt in dieser Frage einnehmen. Denn die Tatsache, daß gewisse chemische Verbindungen nur in organismischen Systemen vorkommen, berechtigt noch nicht ohne weiteres zur Aufstellung eines prinzipiellen Unterschiedes, wofern nur die Elementarbestandteile (also die chemischen Elemente), aus denen diese Verbindungen kombiniert sind, und die Gesetzmäßigkeiten ihrer Zusammenfügung nicht prinzipiell verschieden sind von denen anorganismischer Systeme. Das ist aber nicht der Fall. Wollte man hier trotzdem einen prinzipiellen Unterschied aufrecht erhalten, so müßte man diesen dann auch machen zwischen organischen und anorganischen Verbindungen, ja sogar zwischen verschiedenen Gruppen der ersteren, ferner zwischen gasförmigen, flüssigen und festen Körpern usw. Der hier bezeichnete Standpunkt wird wohl von der Mehrzahl der Biologen geteilt (siehe S. 82).

Demgegenüber gibt es aber eine kleine Gruppe von Autoren, die die Ansicht vertreten, daß ein prinzipieller Unterschied zwischen der Art des Aufbaus anorganismischer und organismischer Systeme vorhanden sei: diese seien durch eine besondere „Organisation“, nämlich eine besondere Art der Verknüpfung von Molekülen und Molekülkomplexen, ausgezeichnet (vgl. z. B. O. Hertwig, Allgemeine Biologie, 3. Aufl., Jena 1909). Doch gründen sich derartige Anschauungen mehr auf Vorurteile als auf Tatsachen.

2b) Unterschied zwischen lebendigem System (lebendigem Organismus) und totem organismischen System (totem Organismus). Bei den höheren Organismen, besonders den höheren Tieren und dem Menschen, ist es im allgemeinen leicht zu sehen, daß ein großer Unterschied zwischen lebendigem und totem Organismus besteht; und zwar einerseits in physischer, andererseits in psychischer Hinsicht.

Zunächst sei ein ganz allgemeines Merkmal des lebendigen Systems genannt, nämlich seine vielseitige und weitgehende „Zweckmäßigkeit“ oder, besser ausgedrückt, Selbsterhaltungsfähigkeit (Näheres hierüber siehe S. 72f.), die vielleicht die charakteristischste Eigenschaft des lebendigen Systems ist. Sie kommt einerseits schon in seinem chemischen, physikalischen und morphologischen Aufbau zum Ausdruck, weshalb auch der tote Organismus noch viele Hinweise auf sie enthält, andererseits aber ganz besonders in den Prozessen des lebendigen Systems. Doch muß darauf hingewiesen werden, daß durchaus nicht alles am lebendigen System zweckmäßig oder der Erhaltung dienlich ist, vielmehr gibt es auch indifferente und schädliche Eigenschaften (Näheres siehe S. 86).

Gehen wir jetzt etwas näher auf die Unterschiede zwischen lebendigen und toten organismischen Systemen ein.

Die physischen Unterschiede zunächst zeigen sich darin, daß nur das lebendige System die Eigentümlichkeit der „Reizbarkeit“ (Näheres siehe S. 77) und den mit ihr eng zusammenhängenden typischen „Stoff- und Energiewechsel (Näheres siehe S. 72) besitzt, welch letzterer darin besteht, daß das System fortwährend Stoffe und Energie aus seiner Umgebung aufnimmt, umsetzt und wieder abgibt, ohne daß sein Stoff- und Energiebestand wesentlich geändert wird, was eben ein Ausdruck seiner Selbsterhaltungsfähigkeit ist. Dazu gesellen sich dann ferner eigenartige Formänderungen, einerseits hauptsächlich jene, die im Wechsel von „Ruhe“ und „Erregung“ (Tätigkeit) des Systems auftreten, andererseits die fortschreitenden Aenderungen während der Entwickelung. All diese Erscheinungen fehlen also dem toten System.

Der psychische Unterschied zwischen lebendigem und totem Organismus ist so zu charakterisieren, daß nur bei jenen, und zwar besonders beim Menschen und den höheren Tieren, das Vorhandensein von „psychischen“ Eigenschaften im engeren Sinne (Empfindungen, Vorstellungen, Gefühlen usw.) angenommen werden kann.

Wir wollen hier schon etwas näher auf die Frage eingehen, worauf wohl in letzter Instanz der Unterschied zwischen d m lebendigen und dem unter möglichst wenig Veränderungen abgestorbenen Organismus beruhe. Bestimmtes hierüber wissen wir noch nicht, aber wir haben jedenfalls anzunehmen, daß dieser Unterschied im Grunde ein solcher des chemisch-physikalischen Aufbaues sei.

Und zwar liegt es nahe anzunehmen, daß der lebendige Organismus vor allem durch den Besitz gewisser chemischer Verbindungen ausgezeichnet sei, die der tote nicht mehr enthält, die also beim Sterben eines lebendigen Systems zugrunde gehen. Was das für Verbindungen sind, ist uns leider noch nicht bekannt und so müssen wir denn diese Lücke in unserem tatsächlichen Wissen durch Hypothesen auszufüllen suchen.

Diese hypothetischen für das lebendige

System charakteristischen Verbindungen müssen folgende Voraussetzungen erfüllen: Einerseits müssen sie gewissen im toten System gefundenen Stoffen möglichst ähnlich gedacht werden und andererseits müssen sie so konstituiert sein, daß durch sie das ganze System eine derartige Beschaffenheit gewinnt, aus welcher alle die charakteristischen nachher zu besprechenden (vgl. S. 69 ff.) Vorgänge des lebendigen Systems abgeleitet werden können. So wie man z. B. die chemische Beschaffenheit eines explosiblen Körpers sich hypothetisch so vorzustellen hat, daß seine spezifischen energetischen Leistungen (plötzliche Entwickelung von mechanischer Energie, Wärme und Licht) und die bei der Explosion entstehenden stofflichen Produkte aus ihr abgeleitet werden können.

Auf Grund solcher Ueberlegungen ist man zu der Annahme des „lebendigen Eiweißes“ (Pflüger) oder, zweckmäßiger ausgedrückt, der „Biogensubstanz“ oder des „Biogens“ (Verworn) (vgl. besonders Max Verworn, Die Biogenhypothese. Eine kritisch-experimentelle Studie über die Vorgänge in der lebendigen Substanz, Jena 1903) gelangt, sehr komplizierter, den zusammengesetzten Eiweißkörpern vielleicht nahestehender Verbindungen, von denen nachher noch die Rede sein wird. Derartige chemische Verbindungen kann man also als besonders charakteristisch für das lebendige System ansehen. Damit ist aber keineswegs gesagt, daß die Biogensubstanzen etwa das „Lebendige“ seien oder daß sich gerade an ihnen das Leben „abspiele“. Denn sie stellen eben doch nur eine Stoffkategorie neben vielen anderen wichtigen Bestandteilen des lebendigen Systems vor und können daher, vom chemischen Standpunkt aus betrachtet, wohl als charakteristischer, kaum aber als wichtiger bezeichnet werden als viele anderen Bestandteile des lebendigen Systems. Denn wir müssen uns vorstellen, daß im lebendigen System, als einem komplizierten chemischen System mit komplizierten Systembedingungen (vgl. P. Jensen, Organische Zweckmäßigkeit, Entwickelung und Vererbung vom Standpunkte der Physiologie, Jena 1907, S. 193 f.), eine große Anzahl verschiedener reagierender Stoffe zum Lebensprozeß zusammenwirken und daß dieser Prozeß ebenso, wie er etwa durch ein abnormes Verhalten des Biogens, auch durch ein abnormes Verhalten der verschiedensten anderen reagierenden Bestandteile (verschiedener sonstigen organischen Verbindungen, etwaiger Katalysatoren, von Salzen oder Säure- und Basis-Ionen, des Wassers) zum Stillstand gebracht werden kann.

Auf eine wichtige Tatsache sei bei dieser Besprechung der lebenswichtigen Bestandteile des Systems schon hingewiesen, nämlich auf die Unentbehrlichkeit des Zellkernes für die Zellen; Protoplasma ohne Zellkern geht zugrunde, ebenso wie ein Zellkern ohne jenes. Dagegen genügt ein Bruchteil des Protoplasmas und ein Bruchteil des Zellkernes einer Zelle, um ein lebensfähiges System zu bilden. Diese Tatsache zeigt, daß das lebendige System eine ganz allgemeine Eigenschaft mit allen anorganismischen chemischen Systemen gemeinsam hat, die man etwa so formulieren kann: Das chemische Verhalten eines Systems ist von den Gewichtsmengen seiner einzelnen „Phasen“ unabhängig (vgl. z. B. W. Nernst, Theoretische Chemie, 2. Aufl. S. 432, Stuttgart 1898). Eine Erläuterung dieses wichtigen Satzes muß hier aber unterbleiben.

Der oben angedeutete chemische Unterschied zwischen dem lebendigen und toten organismischen System ist wohl auch mit gewissen physikalischen Differenzen verbunden, womit dann die Grundlage für das sonstige verschiedene Verhalten des Systems in den beiden Zuständen gegeben ist, z. B. kann man annehmen, daß während des Lebens im Allgemeinen die undifferenzierte protoplasmatische Grundmasse „flüssig“ (in dem üblichen Sinne) oder genauer ausgedrückt „durch Oberflächenkräfte leicht deformierbar“ ist, während dies für die abgetötete Substanz gewöhnlich nicht mehr gilt.

Wir wollen nun auch hier die Frage aufwerfen, ob der angedeutete Unterschied zwischen lebendigem und totem organismischen System prinzipiell genannt werden könne. Hierauf ist folgendes zu antworten: Wenn dieser Unterschied wirklich im wesentlichen nur darin besteht, daß im lebendigen System Biogensubstanzen oder dgl. vorkommen und im toten nicht und wenn diese Biogensubstanzen sich etwa so verhalten, wie wir annehmen, also im wesentlichen so wie andere chemische Verbindungen, dann haben wir die obige Frage mit Nein zu beantworten. Damit wollen wir uns vorläufig begnügen. Wir werden später nochmals hierauf zurückkommen (vgl. S. 81 ff.), nämlich wenn wir die Lebensprozesse etwas näher betrachtet haben. Dann werden wir sehen, daß die Annahme von Biogensubstanzen oder ähnlichen den allgemeinen chemischen Gesetzen unterliegenden Substanzen für die Erklärung der Lebensprozesse im wesentlichen ausreicht, d. h. daß wir keine weitere derartige Annahme zur Erklärung des Unterschiedes zwischen lebendigem und totem organismischen System zu machen brauchen.

Endlich sei noch erwähnt, daß die genannte

hypothetische Annahme von Biogensubstanzen oder ähnlichem wohl von manchen Forschern als unnötig abgelehnt wird, indem diese meinen, daß die chemischen Verbindungen des lebendigen und toten Systems „im wesentlichen" dieselben seien (vgl. z. B. F. Röhmann Biochemie Berlin 1908 S. 1 f.). Das ist aber nur ein leeres Wort, mit dem sich der nicht zufrieden geben kann, dem daran gelegen ist, den bei den „höheren" Tieren besonders offenkundigen ungeheuren physikalisch-energetischen und psychischen Unterschied (siehe S. 67) des lebendigen und toten organismischen Systems zu verstehen.

3. **Die für das Leben charakteristischen Vorgänge im lebendigen System und ihre Bedingungen.** Bis jetzt wurde das lebendige System nur ganz allgemein charakterisiert im Gegensatz zu anorganismischen und toten organismischen Systemen. Hierbei wurde nur die eine Gruppe von Lebenserscheinungen etwas näher bezeichnet, nämlich diejenigen, welche die chemische, physikalische und morphologische Beschaffenheit des lebendigen Systems betreffen. Dagegen wurde die zweite große Gruppe von Erscheinungen, nämlich, die Erscheinungswechsel oder Vorgänge (Prozesse) des lebendigen Systems bisher nur flüchtig angedeutet. Diese müssen wir jetzt etwas näher betrachten. Und zwar wollen wir zunächst vorwiegend nur die tatsächlichen Prozesse und einige aus ihnen direkt sich ergebende Folgerungen behandeln; im nächsten Hauptabschnitt wenden wir uns dann zu den Verknüpfungen der Tatsachen und damit zu den Theorien des Lebens.

Die hier in Betracht kommenden Vorgänge sind außerordentlich mannigfaltig und bei verschiedenen lebendigen Systemen sehr verschieden. Man vergleiche nur die Lebenserscheinungen eines Menschen, eines Baumes und eines Bakteriums. Hier sollen vorwiegend nur die allgemeinen, also die im wesentlichen allen lebendigen Systemen gemeinsamen Prozesse Platz finden, daneben aber auch wohl gewisse typische Erscheinungen der höheren Tiere. Denn diese zeigen viele Prozesse, die zwar nicht allem Lebendigen zukommen, aber doch als besonders augenfällige und interessante Lebenserscheinungen bekannt sind.

Ehe wir uns zur Darstellung der einzelnen Lebensvorgänge wenden, sei nochmals auf ein fast allen gemeinsames wichtiges Merkmal hingewiesen, nämlich daß sie größtenteils in hohem Grade „zweckmäßig" sind, also der Selbsterhaltung des Organismus dienen.

Die Gesamtheit der Lebensvorgänge zeigt zunächst die zwei großen Gruppen der „physischen" und „psychischen" Prozesse. Wir wollen uns hier aber vorwiegend nur mit jenen beschäftigen, also mit dem physischen (körperlichen, materiellen) Leben; schon aus dem Grunde, weil es fraglich ist, ob „psychische" Erscheinungen in nennenswertem Maße jedem lebendigen System zukommen.

Damit aber ein System Lebenserscheinungen zeige, müssen außer den in ihm selbst gegebenen Bedingungen auch gewisse äußere Bedingungen erfüllt sein. Und zwar ist das lebendige System in besonderem Maße von äußeren Bedingungen abhängig, d. h. es ist nach der Ausdrucksweise der Physik ein hochgradig unfreies System, wie nur wenige anorganismische Systeme. Daß das lebendige System außerordentlich abhängig von seiner Umgebung ist, darauf weist schon sein stetiger Stoff- und Energieaustausch mit dieser hin.

Wenn wir das lebendige System hinsichtlich seiner physischen oder materiellen Eigenschaften analog behandeln wie der physikalische Chemiker ein „materielles System", in dem auch chemische Prozesse vonstatten gehen, so können wir zweckmäßigerweise drei Gruppen von Bedingungen [1]) unterscheiden, nämlich die äußeren Bedingungen und zwei Gruppen von Systembedingungen, welch letztere sich auch als „innere" Bedingungen zusammenfassen lassen. Außer der Kenntnis dieser Bedingungen braucht der physikalische Chemiker dann zur vollständigen Charakterisierung eines Systems noch die der „reagierenden Stoffe". Was von solchen für das lebendige System etwa in Betracht kommt, ist schon oben bei der Besprechung der Beschaffenheit und Zusammensetzung des lebendigen Systems angegeben worden. Hier wollen wir nun auf die drei Gruppen von Bedingungen des Systems etwas näher eingehen.

I. Die äußeren Bedingungen bestehen in der chemisch-physikalischen Beschaffenheit der anorganismischen und organismischen Umgebung eines lebendigen Systems, soweit sie auf letzteres „einwirkt". Für jede einzelne Zelle eines vielzelligen Organismus gehört stets auch der ganze übrige Organismus zu den äußeren Bedingungen.

Der Umstand, daß die äußeren Bedingungen der lebendigen Systeme so mannigfaltig und von so einschneidender Bedeutung für das Leben sind, hat zur Bildung des Begriffes der „Lebensbedingungen" geführt, worunter im allgemeinen diejenigen äußeren Bedingungen verstanden werden, unter denen sich ein lebendiges System zu erhalten vermag. In diesem Sinne sind also die Lebensbedingungen gleichbedeutend mit „Erhaltungsbedingungen" oder „Existenzbedingungen".

[1]) Der physikalische Chemiker freilich braucht bei seinen einfacheren Systemen und Bedingungen eine derartige Gruppeneinteilung im allgemeinen nicht.

Diese Erhaltungsbedingungen sind für verschiedene lebendige Systeme sehr verschieden. Es ist augenscheinlich, daß z. B. die Erhaltungsbedingungen der Pflanzen erheblich andere sind als die der Tiere. Dieser Unterschied gipfelt in der Tatsache, daß die pflanzlichen Systeme keiner Zufuhr von Proteinsubstanzen (Eiweißkörpern), Kohlehydraten und Fetten bedürfen, während eine Zufuhr dieser Nahrungsstoffe, die nur mit Hilfe der Pflanzen möglich ist, für die tierischen Syteme zu den Erhaltungsbedingungen gehört. Ferner ist es klar, daß die Erhaltungsbedingungen der Wassertiere andere sind als die der Landtiere usw. Aber auch weniger verschiedene Organismen können recht verschiedene Erhaltungsbedingungen haben.

Im allgemeinen gehören zu den Erhaltungsbedingungen eine gewisse chemische Zusammensetzung und gewisse osmotische Eigenschaften des umgebenden Mediums, wozu auch die Nahrung mit Einschluß von Sauerstoff und Wasser zu rechnen ist; ferner eine gewisse Temperatur, ein gewisser mechanischer Druck (Luft- oder Wasserdruck) und eine gewisse Menge von Licht.

Wie groß aber die Differenzen sein können, die verschiedene Organismen hinsichtlich dieser allgemeinen Bedingungen zeigen, das sei nur an einem Beispiel, nämlich dem der Temperatur, erläutert. Für den Menschen und die meisten Homoiothermen („Warmblüter") sind die zu ihrer Erhaltung nötigen Außentemperaturen derart, daß die Eigentemperatur dieser Organismen nicht erheblich von 37° abweichen kann. Demgegenüber gibt es Bakterien, die noch bei der relativ hohen Außen- und Eigentemperatur von + 72° gedeihen, und die Sporen mancher Bakterien können sogar Temperaturen von mehr als + 100° vertragen. Desgleichen vermögen auch gerade die Bakterien besonders niedere Temperaturen auszuhalten; manche Formen waren selbst durch die zehnstündige Einwirkung einer Temperatur von — 252° nicht abzutöten.

Aehnliches wie für die Temperatur gilt auch für andere Erhaltungsbedingungen, so daß allgemeine Lebensbedingungen nur in sehr groben Umrissen angegeben werden können.

Umfassender aber als die Frage nach den Erhaltungsbedingungen ist die nach der Bedeutung der verschiedenen äußeren Bedingungen für das Leben eines Systems. Bei der Beantwortung dieser Frage verfährt man am zweckmäßigsten so, daß man die gesamten äußeren Bedingungen zunächst hinsichtlich ihrer Konstanz und Variabilität nach Ort und Größe der wirksamen Faktoren klassifiziert. So kann man drei Gruppen unterscheiden, deren strenge Scheidung freilich nicht möglich ist; aber auch diese ungefähre Abgrenzung ist der Orientierung sehr dienlich.

1. Relativ konstante Bedingungen (oder Faktoren), wie Luft- und Wasserdruck und die allgemeine chemische Beschaffenheit der äußeren Medien;

2. Fluktuierende Bedingungen, d. h. zwischen verschiedenen endlichen Werten schwankende Faktoren, wie z. B. Licht, Temperatur, zum Teil die Nahrung, im höheren Organismus verschiedene Einwirkungen der Teile des Systems aufeinander usw.;

3. Periodisch-wirkende Faktoren, d. h. zwischen Null und endlichen Werten schwankende Faktoren, wie z. B. teilweise die Nahrung, gewisse Einwirkungen verschiedener Teile eines lebendigen Systems aufeinander, verschiedene Druckwirkungen fester Körper, die Befruchtung usw., kurz eine Menge verschiedenster anorganismischer (Hagel, Blitz, große Trockenheit, Hitze) und organismischer Einwirkungen (andersgeschlechtige Individuen, Freunde, Feinde).

Besonders zu den beiden letzten der genannten Gruppen von Bedingungen, also zu den fluktuierenden und periodisch auftretenden gehört auch die wichtige Gruppe der Faktoren, die man als „Reize" bezeichnet. Dies sind gewisse, aber durchaus nicht alle Vorgänge in der Umgebung eines lebendigen Systems. Ob ein solcher Vorgang einen Reiz darstellt oder nicht, ist aus seiner Wirkung zu erkennen; denn nur Vorgänge, die ganz bestimmte Wirkungen („Erregung", „Lähmung" und „Hemmung"; hierüber siehe S. 76) haben, werden im allgemeinen als Reize bezeichnet. Näheres hierüber folgt später. Es sei jedoch bemerkt, daß Verworn (Allgemeine Physiologie 5. Aufl. Jena 1909 S. 411) den Reiz anders definiert, nämlich als „jede Veränderung in den äußeren Lebensbedingungen"; wobei „Lebensbedingungen" im Sinne von „Erhaltungsbedingungen" gemeint sind, nämlich die „Bedingungen, die erfüllt sein müssen, wenn das Leben eines Organismus überhaupt bestehen soll" (a. a. O. S. 320).

Für die sämtlichen genannten Bedingungen (mit Einschluß der Reize), denen lebendige Systeme ausgesetzt sein können, hat man also, wie schon bemerkt, festzustellen, welche Bedeutung sie für den Organismus haben; hier sind im allgemeinen vier verschiedene Möglichkeiten gegeben: 1. Die betreffenden Faktoren können nach Qualität und Quantität für ein lebendiges System förderlich und günstig sein, ohne jedoch unbedingt notwendig zu sein (z. B. Nahrungs- und Temperaturverhältnisse oberhalb des notwendigen Minimums); 2. die Bedingungen

sind für die Erhaltung des Systems unbedingt notwendig, wie z. B. ein bestimmtes Minimum von Nahrung, Temperatur usw.; 3. die Faktoren sind indifferent für das Leben des Systems, nämlich die weder physikalisch noch chemisch auf den Organismus einwirkenden Umgebungsbestandteile; 4. die Faktoren sind schädlich, so daß sie das Leben des Systems gefährden. Es kann hier nicht näher ausgeführt werden, inwieweit die verschiedenen oben charakterisierten äußeren Bedingungen eine der eben aufgezählten Rollen spielen.

II. Die zweite Gruppe der Bedingungen des lebendigen Systems enthält einerseits jene, die der physikalische Chemiker gewöhnlich schlechthin als „Systembedingungen" bezeichnet, andererseits ferner einige, die zur Charakterisierung des lebendigen Systems noch besonders angeführt seien; wir wollen sie alle Systembedingungen I nennen. Hierher gehört der innere „mechanische" Druck[1]) des Systems; seine Temperatur und sein „thermodynamisches Potential". Was zunächst die beiden ersten dieser Bedingungen betrifft, so könnte man vielleicht meinen, daß sie schon durch den äußeren Druck und die äußere Temperatur gegeben seien; das ist aber durchaus nicht immer der Fall. Es kann z. B. in manchen Zellen (besonders in Pflanzenzellen) der innere mechanische Druck (Turgordruck) um viele Atmosphären größer sein als der äußere; und ebenso stimmt besonders im homoiothermen Organismus (Warmblüter) die Innentemperatur durchaus nicht immer mit der Außentemperatur überein. Auf die sehr abstrakte Größe des „thermodynamischen Potentials" sei nicht näher eingegangen und nur bemerkt, daß dieses sehr eng mit den Konzentrationsverhältnissen der verschiedenen chemischen Bestandteile („Komponenten") des Systems zusammenhängt.

Die Abhängigkeit des lebendigen Systems von den eben genannten Bedingungen ist ganz ähnlich wie bei anorganismischen Systemen; z. B. tritt auch in jenem mit steigender Temperatur eine ganz bestimmte Vergrößerung der Reaktionsgeschwindigkeit bei verschiedenen Prozessen ein usw.

Die hier ferner noch zu nennenden Bedingungen bestehen darin, daß sehr häufig im lebendigen System Massenbewegungen, elektrische Potentialdifferenzen und Enzyme oder Katalysatoren usw. vorhanden sind.

III. Als dritte Gruppe von Bedingungen des ledendigen Systems kommen solche in Betracht, die man sonst als „Maschinenbedingungen" bezeichnet; wir wollen sie Systembedingungen II nennen. Zur Charakterisierung der Maschinenbedingungen diene der Hinweis, daß das gleiche Heizmaterial ganz verschiedene Leistungen vollbringt, je nachdem es in einem offenen Kamin, oder in einer Lokomotive oder in einer mit Dynamomaschine usw. verbundenen Dampfmaschine verbrennt.

Im lebendigen System einer Zelle gehören zu den Systembedingungen II die (wahrscheinlich) „semipermeablen" Grenzschichten zwischen Protoplasma und Umgebung, Protoplasma und Zellkern usw.; ferner die räumliche Anordnung des Protoplasmas und seiner Bestandteile und des Kernes und seiner Bestandteile in der Zelle; endlich die kapillaren Dimensionen der Zellen und ihrer Teile, wodurch die für makroskopische Verhältnisse geltenden Gesetzmäßigkeiten gewisse Aenderungen erfahren (vgl. W. Gibbs, Thermodynamische Studien, Deutsche Uebersetzung, Leipzig 1892).

Bei näherer Betrachtung zeigen manche dieser Systembedingungen noch eine besondere, für lebendige Systeme charakteristische Eigentümlichkeit; nämlich manche Teile des Systems, die Systembedingungen darstellen, sind gleichzeitig Bestandteile des chemischen Systems, also reagierende, an den Prozessen teilnehmende Stoffe, z. B. die Grenzschichten von Protoplasma und Kern, so daß also die Bedingungen variabel sind.

Ist ein lebendiges System nicht einzellig sondern mehrzellig, so kommen, wie besonders bei den höheren Tieren und Pflanzen, mit den Hüll-, Stützsubstanzen, Gefäßen usw. noch viele weitere Systembedingungen hinzu.

Endlich sei noch bemerkt, daß auch unter den Systembedingungen I und II, ähnlich wie bei den äußeren Bedingungen, förderliche, notwendige, indifferente und unter Umständen auch schädliche unterschieden werden können.

3a) Die charakteristischen physischen Prozesse des lebendigen Systems. Wenn wir die physischen Vorgänge eines lebendigen Systems in ihrem ganzen Umfange überblicken, so finden wir, daß sie je nach den Bedingungen, unter denen das System lebt, recht beträchtliche Unterschiede darbieten. Demnach unterscheiden wir erstens das aktuelle (vollentfaltete) Leben, was gewöhnlich gemeint ist, wenn von Leben schlechthin die Rede ist; zweitens das latente Leben, wie z. B. das Leben eines Samenkorns, und drittens das pathologische, speziell das tödlich veränderte Leben oder Sterben.

α) Das aktuelle Leben und seine Bedingungen. Wie schon angedeutet (siehe oben S. 67) befindet sich das lebendige System niemals in einem voll-

[1]) Dieser wird zum Unterschied vom „osmotischen" Druck gewöhnlich als „hydrostatischer" bezeichnet.

ständigen statischen Gleichgewichtszustande, indem fortwährend Prozesse in ihm verlaufen. Unter der Gesamtheit dieser Vorgänge kann man drei Kategorien unterscheiden, die indes aufs innigste miteinander zusammenhängen und zum Teil ineinander übergehen:

1. Die Prozesse der ersten Kategorie sind dadurch ausgezeichnet, daß sie mit zeitweiligen Unterbrechungen dauernd in ziemlich gleicher Weise verlaufen und zwar in solcher Kombination (vgl. weiter unten), daß das lebendige System dabei längere Zeit ziemlich unverändert bleibt. Es sind das die Lebensprozesse während der „Ruhe" des Systems; z. B. die Vorgänge, welche in einem ruhenden lebenden Muskel verlaufen. Diese Prozesse seien entsprechend der Bezeichnungsweise der physikalischen Chemie „stationäre Lebensprozesse" genannt.

2. In der zweiten Kategorie finden wir Prozesse, die in zeitweiligen „Störungen" der stationären Lebensprozesse bestehen, wobei gewisse Komponenten der letzteren gewissermaßen an- und wieder abschwellen; hierbei treten mannigfache Aenderungen in den Erscheinungen des Systems auf, die in zwei Phasen verlaufen, von denen die zweite die Aenderungen des ersten kompensiert, so daß man hier von umkehrbaren (reversiblen) Aenderungen sprechen kann, wobei umkehrbar im Sinne „umkehrbarer Kreisprozesse" und nicht in dem „umkehrbarer chemischer Reaktionen" gemeint ist. Diese können entweder in regelmäßigen oder in mehr oder minder unregelmäßigen Perioden erfolgen. Als Beispiel sei angeführt der zeitweilige Uebergang eines Skelettmuskels von der „Ruhe" zur „Tätigkeit" und die Rückkehr in die Ruhe. Derartige Prozesse seien als „physiologische Schwankungen" der stationären Lebensprozesse bezeichnet.

3. Als dritte Kategorie von Prozessen des lebendigen Systems sind endlich gewisse fortschreitende, nicht mehr zurückgehende, nicht umkehrbare (irreversibele) Aenderungen anzuführen, die bald schon nach kürzerer, bald erst nach längerer Zeit merklich werden. Das sind die Aenderungen, deren Gesamtheit als Entwickelung eines lebendigen Systems bezeichnet wird.

Nochmals sei wiederholt, daß diese drei Arten von Prozessen in Wirklichkeit keineswegs voneinander getrennt, sondern nur verschiedene Erscheinungsweisen oder auch Komponenten eines einzigen komplizierten Vorganges sind, den man mit der Strömung eines Flusses vergleichen kann, dessen Wasser sowohl fortschreitet als auch zugleich mannigfache Wellenbewegungen zeigt.

Ehe wir auf die bei Kategorien von Aenderungen des lebendigen Systems im einzelnen eingehen, wollen wir zunächst einen Blick auf die Bedingungen werfen, unter denen das aktuelle Leben eines Systems sich äußert. Diese sind kurz so zu charakterisieren, daß jedenfalls mehr als nur das Minimum der unbedingt notwendigen Bedingungen gegeben sein muß, also im allgemeinen auch förderliche, dagegen keine schädlichen Bedingungen.

aa) Die stationären Lebensprozesse (Prozesse des „ruhenden" lebendigen Systems). Beobachten oder untersuchen wir ein lebendiges System unter den Bedingungen des aktuellen Lebens, aber ohne daß „Reize" einwirken, d. h. wenn das System sich in „Ruhe" befindet, so bemerken wir folgendes: Das System bleibt im wesentlichen unverändert in seiner chemischen und physikalisch-energetischen Zusammensetzung und in seiner Form und dennoch geht durch das System ein fortwährender Stoff- und Energiestrom; es zeigt sich eine dauernde Einfuhr, Umsetzung und Ausfuhr von Stoffen und Energie, d. h. der lebendige „Stoff- und Energiewechsel". Dieser ist besonders bei höheren Tieren sehr leicht und deutlich zu erkennen. Ein erwachsener Mensch z. B. gibt in 24 Stunden, auch wenn er in dieser Zeit keine Nahrung zu sich nimmt, etwa 800 g Kohlensäure, die auf eine Zersetzung von Kohlehydraten, Fetten und Proteinsubstanzen hinweist, durch die Lungen nach Außen ab, ferner über 1,5 l Wasser durch Nieren und Lungen, etwa 30 g Harnstoff, der nachweislich aus der Verarbeitung von Proteinsubstanzen herrührt, durch die Nieren usw.; außerdem läßt er allein an Wärmeenergie etwa 2000 Kalorien nach Außen abfließen. Daher würde der Mensch in kurzer Zeit außerordentlich an Stoff und Energie verarmen, wenn diese nicht immer wieder durch entsprechende Einfuhr ersetzt würden. Für einen solchen Ersatz, der in der Nahrung dargeboten wird, braucht man von organischen Stoffen z. B. etwa 120 g Eiweiß, 80 g Fett und 300 g Kohlehydrate oder bestimmte andere Kombinationen dieser Nahrungsstoffe; und diese Nahrungsmenge hat auch einen Gehalt von chemischer Energie, der einer Wärmemenge von etwa 2000 Kalorien äquivalent ist.

In diesen Beziehungen zwischen Einnahmen und Ausgaben von Stoff und Energie, die für jede einzelne Zelle, überhaupt für jedes lebendige System gelten, kommen die „stationären" Lebensprozesse zum Ausdruck, für die charakteristisch ist, daß sie die Beschaffenheit des Systems nicht wesentlich ändern.

Man hat in dieser Hinsicht den Organismus häufig mit einer Gasflamme von bestimmter gleichbleibender Form (z. B. Schmetterlingsform) verglichen. Auch hier

haben wir es mit einem fortwährenden Zuströmen, Sich-Umsetzen und Abströmen von Stoff und Energie zu tun, bei gleichbleibender chemisch-physikalischer Beschaffenheit und Form der Flamme. Im Gegensatz zu diesem stationären Prozeß sei an ein brennendes Stück Papier erinnert, wo ein analoger Stoff- und Energieumsatz stattfindet, aber unter Zerstörung der anfänglichen Konfiguration des Systems. Dieser Vergleich lehrt, daß die „Stationarität“ und also auch die Erhaltung der Prozesse im lebendigen System und in der Gasflamme von der stetigen Zufuhr von Ersatzmaterial abhängig ist, welches beim lebendigen System durch die Nahrung im weitesten Sinne dargestellt wird. Wenn nicht genügend oder gar keine Nahrung zugeführt wird, so nimmt wegen der gleichwohl weitergehenden Stoffumsetzung und Stoffabgabe das lebendige System mehr und mehr an Masse ab, seine Prozesse werden immer schwächer, bis endlich das Leben erlischt, gleich einer Gasflamme bei Behinderung des Gaszuflusses.

Nun ist aber hinzuzufügen, daß hinsichtlich der wichtigen Eigenschaft der Erhaltung zwischen der Gasflamme und dem lebendigen System noch ein sehr charakteristischer Unterschied besteht: Das letztere besitzt, wie bereits erwähnt, in hohem Maße die Fähigkeit der Selbsterhaltung, die Gasflamme aber nicht; d. h. der Gasflamme muß das Brennmaterial aus einer gasbereitenden Vorrichtung geliefert werden, ebenso wie z. B. eine Dampfmaschine, mit der man das lebendige System oft verglichen hat, zur Erhaltung ihrer Tätigkeit besonders bedient werden muß; das lebendige System dagegen benutzt, ohne fremder Hilfe zu bedürfen, seinen eigenen Stoff- und Energiewechsel dazu, sich das zu seiner Erhaltung erforderliche Betriebsmaterial zuzuführen. Hierbei spielen freilich bei den meisten lebendigen Systemen auch die „physiologischen Schwankungen“ der „stationären“ Prozesse (Muskeltätigkeit usw.) eine besondere Rolle. Und wenn in seiner näheren Umgebung die Bedingungen hierfür ungünstig sind, so besitzt das lebendige System im allgemeinen die Fähigkeit, solche schädlichen Bedingungen zu fliehen und die zur Erhaltung notwendigen und förderlichen aufzusuchen. Wird dieses Ziel nicht erreicht, so kommt bei manchen lebendigen Systemen die Fähigkeit zum Vorschein, sich durch Cystenbildung, Sporenbildung usw. gegen Schädlichkeiten zu schützen. Haben ferner wirklich Schädigungen stattgefunden, so zeigt sich das Vermögen der Regeneration, der Narbenbildung usw. Man kann daher mit Recht sagen, daß das lebendige System in hohem Maße die Fähigkeit besitzt, selbst unter relativ ungünstigen Bedingungen sich selbst zu erhalten, während alle uns bekannten komplizierteren anorganismischen stationären Prozesse nur unter Mithilfe von Organismen unterhalten werden können.

Die unveränderte chemische, energetische und morphologische Beschaffenheit des lebendigen Systems während der „Ruhe“, also wenn die stationären Prozesse keine Schwankungen zeigen, wird dadurch ermöglicht, daß in der Zeiteinheit durchschnittlich ebensoviel Stoff und Energie, wie umgesetzt und ausgeschieden wird, auch wieder ersetzt wird; d. h. daß „Stoff- und Energiewechsel-Gleichgewicht“ besteht. Man hat dieses wohl als ein chemisches Gleichgewicht (vgl. z. B. W. Nernst Theoretische Chemie II. Aufl. Stuttgart 1898 S. 398 fg.) nach Art desjenigen in einem Gemisch von Alkohol, Essigsäure, Aethylacetat und Wasser aufgefaßt, was aber nicht zutreffend ist[1]), vielmehr handelt es sich hier um ein „dynamisches Gleichgewicht“ zwischen vorwiegend irreversibeln chemischen Prozessen, ebenso wie auch bei der Gasflamme ein solches vorliegt.

Betrachten wir den stationären (oder Ruhe-) Stoffwechsel und Energiewechsel etwas näher.

1. Was zunächst den Stoffwechsel anbetrifft, so finden wir, wie schon bemerkt, daß fortwährend Stoffe in das lebendige System eintreten und zwar vorwiegend solche, die man als „Nahrungsstoffe“ („Nahrungsmittel“) bezeichnet. Diese sind dadurch charakterisiert, daß sie geeignet sind, den typischen, oben geschilderten Stoffbestand des lebendigen Systems, das durch seinen Stoffwechsel fortwährend Stoffe verbraucht und verliert, zu erhalten und gegebenenfalls zu vermehren. Die Stoffe, die diese Qualitäten besitzen, sind für das tierische[2]) lebendige System im wesentlichen identisch mit den Bestandteilen der toten organismischen Systeme, die ja auch den lebenden Tieren hauptsächlich zur Nahrung dienen. Es sind also Proteinsubstanzen (und verwandte Stoffe), Kohlehydrate, Fette, Phosphatide usw., ferner anorganische Salze, Wasser und Sauerstoff; der letztere, der bei der Atmung aufgenommen wird, gehört nämlich auch zu den Nahrungsstoffen im weiteren Sinne. Es ist noch zu bemerken, daß von den organischen Nahrungsstoffen

[1]) Vielleicht spielen bei diesen Prozessen unter anderem auch echte „chemische Gleichgewichte“ der oben genannten Art mit, wovon später die Rede sein wird.

[2]) Das pflanzliche lebendige System verhält sich in dieser Hinsicht freilich erheblich anders.

den Proteinsubstanzen, speziell den Eiweißkörpern, eine besondere Bedeutung zukommt, insofern sie alle anderen organischen Nahrungsstoffe innerhalb gewisser Grenzen ersetzen können, was kein anderer Nahrungsstoff vermag.

Außer den Nahrungsstoffen können ferner auch noch andere Körper aufgenommen werden, wie indifferente Stoffe, schädliche Stoffe, Arzneistoffe, Exkretstoffe, die in höheren Tieren „Exkretionszellen" (z. B. die der Niere) passieren usw. Die Gesamtheit der Stoffe, die von dem lebendigen System aufgenommen wird, ist das „Stoffwechselmaterial".

Je nachdem das Stoffwechselmaterial von festem, flüssigem oder gasförmigem Aggregatzustand ist, ist der Vorgang der Aufnahme von seiten des lebendigen Systems, wobei wir hauptsächlich an einzelne Zellen denken wollen, verschieden. Während die gelösten Stoffe wohl unter teilweiser Mitwirkung hydrostatischer (Filtration) und osmotischer Druckdifferenzen wahrscheinlich hauptsächlich vermöge chemischer und molekularer (Adsorption usw.) Wirkungen des semipermeablen lebendigen Protoplasmas in die Zellen hineingelangen, können z. B. Nahrungsstoffe, die nicht im umgebenden Medium gelöst sind, von einer Zelle oder einem einzelligen Organismus meistens nur derart aufgenommen werden, daß der letztere sich in einer hierfür geeigneten Weise bewegt.[1]) An diesen Umstand besonders knüpft sich das vielerörterte Problem der „Nahrungsauswahl" durch die Zelle. Es ist nämlich festgestellt, daß die „zweckmäßigen" Aufnahmebewegungen von seiten der Zelle im allgemeinen nur dann ausgeführt werden, wenn es sich um einen Körper handelt, der als Nahrung für die betreffende Zelle geeignet ist. Daraus haben manche Autoren den Schluß gezogen, daß einzellige Organismen und einzelne Gewebszellen ein „bewußtes" Unterscheidungsvermögen oder dgl. besäßen. Auf das Unberechtigte dieser Anschauung werden wir später zurückkommen (vgl. S. 82).

Es ist noch zu erwähnen, daß das Stoffwechselmaterial, das von den Zellen vielzelliger Organismen aufgenommen wird, gewöhnlich einen recht langen und komplizierten Weg bis zum Eintritt in die einzelnen Zellen zurückzulegen hat. Um z. B. nur beim Menschen diesen Weg anzudeuten, so führt er durch den Mund in den Darmkanal (für den Sauerstoff in die Lungen) und von dort durch die Blutgefäße, Lymphgefäße und Gewebsflüssigkeit zu den Zellen.

[1]) Hierbei haben wir es freilich dann schon mit einer physiologischen „Schwankung" des stationären Stoffwechsels zu tun.

2. Das in das lebendige System aufgenommene Stoffwechselmaterial (im besonderen die Nahrungsstoffe) erfährt innerhalb desselben eine Reihe von chemischen Veränderungen, die zum Teil mit erheblichen energetischen Aenderungen verbunden sind. Bei dem Nahrungsmaterial beginnen diese Aenderungen unter Mitwirkung von „Enzymen" mit der Verdauung, die bei einzelligen Systemen intrazellulär und bei mehrzelligen im wesentlichen extrazellulär ist. Daran anschließend und daneben kommen dann noch sehr mannigfache Prozesse vor; von diesen kennen wir aber nur Bruchstücke und vermögen von anderen Teilprozessen nur aus den chemischen Verbindungen, die in ihrem Verlauf („intermediäre" Produkte) und an ihrem Ende (Endprodukte) entstehen, einige Andeutungen über die Art dieser Prozesse zu gewinnen. Leider haben sich gerade die „intermediären" Produkte und die „intermediären" Prozesse bis jetzt größtenteils der Feststellung entzogen. Das ist um so mehr zu bedauern, als wir annehmen müssen, daß wir es hier gerade mit den für das Leben besonders charakteristischen Verbindungen und Prozessen zu tun haben.

Ganz allgemein können wir sagen, daß im lebendigen System sowohl chemische Synthesen d. h. thermonegative Prozesse als auch Spaltungsprozesse d. h. thermopositive Prozesse (besonders oxydative Spaltungen) als auch sonstige Veränderungen des Stoffwechselmaterials ohne besondere Wärmetönung (kurz als „metathetische" Prozesse bezeichnet) verlaufen, manche dieser Prozesse unter Mitwirkung verschiedener „Enzyme". Von Enzymen, einschließlich der vorher genannten Verdauungsenzyme, sind im Organismus eine große Menge festgestellt worden, von denen einige hier genannt seien: Oxydasen (oxydierende Enzyme), Diastasen (verwandeln Stärke und Glykogen in Dextrin und Maltose), Maltasen (verwandeln Maltose und Dextrin in Traubenzucker, ein Prozeß, der unter Umständen auch umgekehrt verlaufen kann), eiweißspaltende oder Proteasen (Pepsin, Trypsin, Erepsin), fettspaltende oder Lipasen (Steapsin), Zymase (vergärt Traubenzucker und einige andere Zucker) usw. Einige charakteristische Verbindungen, die bei diesen Prozessen im lebendigen System gebildet werden, aber auch im toten System noch vorhanden sein können, seien angegeben:

Erstens lassen sich solche anführen, die wohl vorwiegend teils durch synthetische, teils durch metathetische Prozesse entstehen, nämlich gewisse Proteinsubstanzen, die für bestimmte Systeme charakteristisch sind, wie z. B. Myosin, Kasein, Hämoglobine

usw., bestimmte Kohlehydrate und Fette usw.; diese Stoffe sind ihrer chemischen Konstitution nach teils bekannt, teils ist ihre Kenntnis angebahnt. Ferner sind hier zu nennen die sogenannten Plasmaprodukte, wie die charakteristischen Bestandteile der Zellhäute, der inneren und äußeren Skelette, überhaupt der Bindesubstanzen usw.; auch von diesen Körpern ist die chemische Konstitution im allgemeinen festgestellt. Endlich gehören hierher Körper, von denen wir zwar Existenzbeweise durch ihre spezifischen Wirkungen, aber im allgemeinen kaum Andeutungen ihrer chemischen Beschaffenheit besitzen: das gilt für die Enzyme, manche „Hormone", Antikörper und überhaupt für alle chemischen Verbindungen, die „Arteigenschaften" (vgl. z. B. O. Hertwig Allgemeine Biologie III. Aufl. S. 439 fg. Jena 1909), „Gattungseigenschaften" oder gar „Individualeigenschaften" besitzen. Die „Hormone" oder „Stoffwechsel-Antreiber" sind teils Produkte der Drüsen mit „innerer" Sekretion, wie der Schilddrüse, die unter anderem das Jodothyrin liefert, der Nebenschilddrüsen, der Nebennieren, die das seiner chemischen Konstitution nach bekannte Adrenalin erzeugen, teils verschiedener anderer Organe, wie des Pankreas, der Keimdrüsen, der Nieren usw. Als Antikörper seien in Kürze alle „Schutzkörper" der Organismen bezeichnet, wie die Antitoxine, bakterizide Stoffe, Hämolysine, Cytolysine, Agglutinine usw., ferner auch die Anti-Enzyme (Antitrypsin usw.). Von diesen Stoffen sind solche, die bei den vielzelligen Organismen aus den Zellen in das Blut oder den Darmkanal usw. abgeschieden werden, wo sie dann bestimmte Leistungen übernehmen, zu den „Sekretstoffen" zu rechnen.

Aus der Gesamtheit der angedeuteten synthetischen und metathetischen Prozesse kann man eine besondere Gruppe herausheben, nämlich diejenigen, welche zur Herstellung solcher Verbindungen führen, die nur im lebendigen System selbst entstehen und am lebendigen Stoff- und Energiewechsel integrierenden Anteil nehmen. Diese wichtige Gruppe von Prozessen, zu denen vor allem auch die Herstellung der hypothetischen Biogensubstanzen zu rechnen wäre, stellt etwa das dar, was E. Hering Assimilierung[1]) nennt; diese Prozesse werden wohl auch als „anabolische" bezeichnet.

Von Produkten, die auf Spaltungsprozesse im lebendigen System hinweisen, seien nur genannt: Harnstoff, Purinkörper, Guanidinderivate, Milchsäure, Ammoniakverbindungen, Kohlensäure usw. Diese Körper sind „Exkretstoffe" (im Gegensatz zu den „Sekretstoffen"), da sie im allgemeinen für das lebendige System keinen Nutzen mehr haben und daher ausgeschieden werden. Sie werden auch zugleich mit anderen Endprodukten des Stoffwechsels, wie Plasmaprodukten und Sekreten, die außer durch Spaltung wohl auch durch metathetische und selbst synthetische Prozesse entstehen und noch einen Nutzen für das System aufweisen können, als „Stoffwechselprodukte" zusammengefaßt. Die Gesamtheit der Prozesse, bei denen die Stoffwechselprodukte gebildet werden, die aus dem lebendigen System ausgeschieden zu werden pflegen — und zwar sind dies vorwiegend Spaltungsprodukte — stellt die „Dissimilierung" oder „Katabolie" dar.

3. Die erwähnte dritte Etappe des Stoffwechsels, die Ausfuhr von Stoffen aus dem lebendigen System, betrifft im wesentlichen die Stoffwechselprodukte, und zwar die Exkrete, Sekrete und in gewissem Sinne auch die Plasmaprodukte. Der Modus der Abgabe ist verschieden je nach den physikalischen Eigenschaften der Abscheidungen, analog den entsprechenden Unterschieden der Aufnahmeerscheinungen. Ferner ist, ebenfalls analog den letzteren, der Weg der Abgabe sehr verschieden bei einzelligen und vielzelligen Organismen. Bei Protisten gelangen z. B. die Exkretstoffe direkt in das umgebende Medium, während sie z. B. bei höheren Tieren im allgemeinen den Umweg über Gewebsflüssigkeit, Lymphe, Blut und Exkretionsorgane machen müssen; die meisten passieren den Harnapparat, die Kohlensäure vorwiegend die Lunge usw.

Zum Schluß dieser Charakteristik des Stoffwechsels sei nochmals darauf hingewiesen, daß Stoffwechselgleichgewicht im lebendigen System herrscht, wenn die Einfuhr von Stoffen, und zwar gilt das lediglich für Nahrungsstoffe (mit Einschluß des Sauerstoffs), ihrer Verarbeitung und Ausfuhr die Wage hält. Da nun sowohl die Einfuhr als auch die Verarbeitung und Ausfuhr von Stoffen vielen Schwankungen unterliegt, so treten damit Störungen des Gleichgewichts ein, von denen nachher ausführlicher die Rede sein wird. Unter normalen Verhältnissen werden solche Störungen aber ziemlich rasch wieder ausgeglichen durch eine Eigentümlichkeit des lebendigen Systems, die man als die „innere Selbststeuerung" des Stoffwechsels bezeichnet hat. Diese kommt darin zum Ausdruck, daß im Falle einer Verminderung der bisherigen Nahrungszufuhr alsbald auch die Umsetzung, also

[1]) An dieser ursprünglichen Bezeichnung statt der jetzt gebräuchlichen „Assimilation" sei hier festgehalten.

der Verbrauch von Nahrung, verringert wird, so daß sich innerhalb gewisser Grenzen ein neues Gleichgewicht auf niedrigerem „Niveau“ einstellen kann. Umgekehrt kann bei gesteigerter Ernährung ein Stoffwechselgleichgewicht auf „höherem Niveau“ zustande kommen. Und ähnliche Regulierungen machen sich geltend, wenn z. B. im Falle einer für die Erhaltung des lebendigen Systems so wichtigen „Schwankung“ der stationären Prozesse vorübergehend eine Erhöhung des Stoffverbrauchs eintritt.

Wie schon gesagt, ist mit dem stationären Stoffwechsel des lebendigen Systems ein Energiewechsel aufs engste verbunden. Und analog den drei Etappen des ersteren können wir auch hier eine Einfuhr von Energie in das System, Verwandlungen und Verschiebungen derselben und eine Ausfuhr von Energie feststellen.

Eingeführt wird vorwiegend chemische Energie, und zwar hauptsächlich mit den Nahrungsstoffen, wie Proteinsubstanzen, Kohlehydraten, Fetten usw.; diese sind sehr reich an chemischer Energie, wie sich aus ihren „Verbrennungswärmen“ ergibt. In geringerem Maße ferner wird unter anderem auch Wärme und Licht (elektro-magnetische Energie) in das System hineingebracht: diese Energie spielt besonders bei den Pflanzen eine wichtige Rolle, für die sie die Hauptenergiequelle darstellt.

Die Energieverwandlungen im lebendigen System sind hauptsächlich derart, daß die eingeführte chemische Energie der Nahrung in verschiedene andere Energieformen übergeführt wird, wie besonders mechanische, elektrische und thermische Energie. Mechanische Energie, und zwar hauptsächlich Bewegungsenergie, und elektrische Energie entstehen freilich hauptsächlich nur bei den physiologischen Schwankungen der stationären Prozesse, elektrische Energie im „ruhenden“ System nur unter besonderen Bedingungen („Demarkationsstrom“). Aus der eingeführten chemischen Energie stammt in tierischen Systemen in letzter Instanz auch die Energie, die für die thermonegativen synthetischen Prozesse gebraucht wird. In den pflanzlichen Systemen ist es vor allem die Lichtenergie, die alle anderen Energieformen liefert, besonders auch die für die Synthese von Kohlehydraten, Fetten und Eiweißkörpern erforderlichen Beträge. Allein durch diese synthetische Arbeit der Kohlensäureassimilierenden Pflanzen werden die großen Quantitäten chemischer Energie angehäuft, deren Zufuhr mittels der Eiweißkörper, Kohlehydrate und Fette eine unentbehrliche Bedingung für die Erhaltung der tierischen lebendigen Systeme ist.

Energieverschiebungen spielen im lebendigen System insofern eine Rolle, als der Eintritt und die Verwandlung der Energieformen meistens an bestimmten Punkten des Systems stattfindet und von hier aus eine Verteilung im System vor sich geht. Das ist besonders deutlich bei den höheren Tieren, wo die Verteilung der Wärme, der chemischen Energie der Nahrung usw. durch den Blutkreislauf geschieht.

Bei der Energie-Ausfuhr endlich beteiligen sich alle im System vorkommenden Energieformen, in erster Linie aber die Wärme. Eine Abgabe mechanischer Energie (äußere Arbeit) findet hauptsächlich bei physiologischen Schwankungen der stationären Prozesse statt.

In den geschilderten stationären Prozessen besteht, zusammen mit den fortschreitenden Aenderungen der Entwickelung, das Wesentliche allen Lebens. Denn es gibt lebendige Systeme (niedere Pflanzen ohne Eigenbewegung), bei denen sich das Leben ganz vorwiegend nur in stationären Prozessen und in Entwickelung äußert.

$\beta\beta$) Die physiologischen Schwankungen der stationären Prozesse. Wir können hier hauptsächlich dreierlei unterscheiden, nämlich die Vorgänge der Erregung (oder Tätigkeit), der Lähmung und der Hemmung. Um sogleich einige Beispiele anzuführen, so kommen solche Schwankungen zum Ausdruck im Auftreten von Bewegung oder einer plötzlichen Verstärkung oder Schwächung einer Bewegung, ferner in der Entstehung von Sekret oder einer plötzlichen Verstärkung oder Schwächung der Sekretbildung usw.

Diese physiologischen Schwankungen der stationären Prozesse sind von der größten ökologischen[1]) Bedeutung, da sie im allgemeinen dann auftreten, wenn die stationären Prozesse für die Erhaltung des Systems nicht ausreichen, oder auch dann, wenn durch die Schwankungen das System unter günstigere Bedingungen als vorher gebracht wird. Ohne die physiologischen Schwankungen der Prozesse in den Muskeln und Nerven von Extremitäten, Mund, Speiseröhre, Magen, Darm usw. wäre die Nahrungsaufnahme beim Menschen nicht möglich, ebenso wie nur durch solche Schwankungen eine Abwehr oder Flucht vor körperlichen Gefahren bewerkstelligt werden kann usw.

Die häufigste und wichtigste Schwankung ist die Erregung, auf die wir daher

[1]) „Oekologie“ heißt die Bedeutung für die Erhaltung, überhaupt für den Stoff- und Energie-Haushalt des Organismus. Die im gleichen Sinne auch gebrauchte Bezeichnung „Biologie“ ist unzweckmäßig, da hierunter ganz allgemein die „Wissenschaft von den lebendigen Systemen“ verstanden wird.

vorwiegend etwas näher eingehen wollen. Betrachten wir die Erregung bei verschiedenen lebendigen Systemen, so finden wir, daß sie, ebenso wie auch die anderen Schwankungen, je nach der Art des Systems sich recht verschieden äußert. Es gibt Systeme, bei denen Schwankungen kaum zu erkennen sind; wie schon bemerkt, ist dies bei niederen Pflanzen ohne Eigenbewegung der Fall, ferner aber auch bei vielen anderen Pflanzenzellen und im Bereich der tierischen lebendigen Systeme bei den „passiv-funktionierenden“ Zellen, wie denen des Bindegewebes, des Knochens, Knorpels usw. Dagegen sind die Schwankungen sehr deutlich und daher von großer ökologischer Bedeutung bei allen einzelligen Organismen mit Eigenbewegung und im Bereich der höheren Organismen bei allen „aktiv-funktionierenden“ Zellen, wie Muskelzellen (überhaupt „kontraktilen“ Zellen), Nervenzellen, Drüsenzellen usw.

Aber auch in der letztgenannten Gruppe sind die Aeußerungsweisen der Schwankungen recht verschiedene. Die hier sich zeigenden Differenzen sind in der üblichen Unterscheidung von „animalen“ und „vegetativen“ Zellen und Geweben zum Ausdruck gebracht. Ein Beispiel der ersteren ist die Muskelzelle, der letzteren die Drüsenzelle. Die „animalen“ Systeme sind dadurch ausgezeichnet, daß in ihnen der Energiewechsel besonders in den Vordergrund tritt (Erzeugung von Bewegungsenergie, Spannungsenergie, Wärme usw. durch den Muskel) und die ökologisch wichtigste „Leistung“ des Systems ist, während dies bei den „vegetativen“ Systemen der Stoffwechsel, besonders die Stoffproduktion (Sekretbildung der Drüsenzelle), ist. Jedoch ist durchaus kein prinzipieller Unterschied zwischen diesen beiden Systemarten. Denn beide zeigen stets sowohl Stoff- als auch Energiewechsel; es ist nur bei der Arbeitsteilung, die bei den Zellen der höheren Organismen durchgeführt ist, eine derartige Differenzierung eingetreten, daß bei den Muskeln usw. die energetische Seite, bei den Drüsen usw. die stoffliche Seite mehr ausgebildet ist. Doch gibt es auch Uebergänge zwischen den beiden Systemarten (z. B. die Leber- und Nierenzellen), ebenso wie bei den einzelligen Organismen animale und vegetative Leistungen noch gleichmäßig in demselben System entwickelt sind.

Werfen wir jetzt einen Blick auf die Bedingungen, unter denen die physiologischen Schwankungen der stationären Prozesse auftreten. Sie werden hervorgerufen oder „ausgelöst“ durch „Reize“ und gehen im allgemeinen zurück, wenn die Reize nachlassen, wofern diese nicht zu intensiv und langdauernd waren. Unter Reizen verstehen wir, wie schon erwähnt (S. 70), solche Prozesse in der Umgebung eines lebendigen Systems (vom vielzelligen Organismus bis zum Bruchteil einer Zelle), welche in diesem physiologische (und im Uebermaß auch pathologische und gegebenfalls tödliche) Schwankungen der stationären Prozesse bewirken.

Manche äußeren Bedingungen des lebendigen Systems werden übrigens häufig als „Reize“ bezeichnet, ohne nach der obigen und auch anderen Definitionen diesen Namen zu verdienen, wie gewisse für die Entwickelung der Knochen wichtige Zug- und Druckwirkungen und andere „trophische“ Einwirkungen, ferner manche Lichtwirkungen usw., kurz Einwirkungen, die keine Schwankungen der stationären Lebensprozesse zur Folge haben. Ferner muß betont werden, daß auch Schwankungen der stationären Prozesse auftreten können, wenn alle äußeren Bedingungen des Systems relativ konstant sind (vgl. S. 70), also unter solchen Bedingungen, die für die meisten lebendigen Systeme „Ruhebedingungen“ sind; z. B. ist ein gewisser CO_2-Gehalt des Blutes ein „Reiz“ für das Atemzentrum. Endlich ist noch darauf hinzuweisen, daß unter Umständen auch im Innern eines lebendigen Systems, nicht nur eines vielzelligen (vgl. S. 69), sondern auch innerhalb einer einzelnen Zelle Reize auftreten, die man als „innere Reize“ bezeichnen kann; so stellt z. B. ein in Erregung befindlicher Teil einer Zelle einen Reiz für seine Nachbarschaft dar. Um es nochmals zusammenzufassen, gehört zum Begriff des Reizes stets zweierlei: Erstens ein Prozeß, der auf ein lebendiges System einwirkt und zweitens eine Schwankung der stationären Prozesse, die durch ihn bedingt ist.

Es gibt, entsprechend den verschiedenen Energieformen, mehrere Gruppen von Reizen, nämlich mechanische (Druck, Stoß, Erschütterung), thermische (Erwärmung), chemische (die verschiedensten chemischen Verbindungen), elektrische (konstanter und Induktionsstrom) und elektromagnetische (Lichtstrahlen, Wärmestrahlen). Solche Faktoren der Umgebung müssen im Augenblick ihrer Einwirkung auf das lebendige System in den meisten Fällen schon eine gewisse Größe haben, um „Reize“ darzustellen oder die „Reizschwelle“ zu überschreiten; z. B. ganz allmählich vom Werte Null an wachsender Druck, elektrischer Strom, Erwärmung usw. wirken im allgemeinen nicht als Reize. Ferner kann derselbe Prozeß der Umgebung für das eine System ein Reiz sein, für das andere nicht. Man unterscheidet überhaupt allgemeine und spezifische Reize; erstere sind solche, die bei allen oder doch den meisten lebendigen Systemen Schwankungen hervorrufen, wie mechanische, elektrische usw. Einwirkungen von bestimmter Größe, letztere solche, die dies nur bei einzelnen Arten von lebendigen Systemen bewirken, wie Schall, Licht, Riechstoffe usw.

Aus der obigen Definition von Reiz er-

gibt sich, daß das lebendige System selbst mitbestimmend dafür ist, ob ein Prozeß in seiner Umgebung einen Reiz darstellt oder nicht; d. h. es kommt darauf an, ob das System auf die Einwirkung der Umgebung mit einer Schwankung reagiert oder nicht. Diese Reaktionsfähigkeit des lebendigen Systems oder die Fähigkeit, Schwankungen der stationären Prozesse zu zeigen, heißt „Reizbarkeit", „Irritabilität" („Erregbarkeit"). Sie tritt besonders prägnant zutage in den Fällen, wo die Reize zu „Erregungen" führen. Dann zeigt sich nämlich im allgemeinen eine auffällige Disproportionalität zwischen der Größe des Reizes und der Größe der Reizwirkung. So kann die Energiemenge, die ein Muskel bei der Erregung umsetzt und produziert, vielleicht hundertmal so groß sein wie die als Reiz dienende Energiemenge. Vorgänge, bei denen eine derartige Disproportionalität besteht, sind auch bei anorganischen Systemen nicht selten (Entspannung einer Feder durch Entfernung eines Sperrzahnes, Explosionen usw.) und werden als „Auslösungen" bezeichnet. Doch bieten nicht alle Reizwirkungen diese Eigentümlichkeit dar.

Die Reizbarkeit eines Systems ist veränderlich, je nach den Bedingungen; durch gewisse günstige Bedingungen kann sie erhöht werden, dagegen wird sie durch schädliche Bedingungen und vor allem durch Reize für längere oder kürzere Zeit herabgesetzt oder auch ganz aufgehoben. Wenn in unmittelbarem Anschluß an eine mäßige Reizung eine flüchtige Aufhebung der Reizbarkeit eintritt, so spricht man von einem „refraktären" Zustande des Systems. Eine längerdauernde Verminderung der Reizbarkeit infolge von anhaltender und intensiverer Reizung wird als „Ermüdung" oder „Erschöpfung" bezeichnet. Auf diese folgt unter den Bedingungen der Ruhe nach entsprechender Zeit wieder die „Erholung".

Alle Aenderungen, die ein lebendiges System bei der Reizung erfährt, beginnen zunächst an dem Orte, wo der Reiz die reizbare Substanz trifft, und breiten sich dann von hier aus mit einer gewissen Geschwindigkeit mehr oder minder vollständig über die ganze reizbare Substanz aus; diesen Vorgang bezeichnet man als „Reizleitung" und, wenn es sich um Erregung handelt, als „Erregungsleitung".

Betrachten wir jetzt zunächst zwei Beispiele von physiologischen Schwankungen etwas näher, und zwar die Erregung einerseits eines Systems mit vorwiegend „animalen", andererseits eines solchen mit vorwiegend „vegetativen Leistungen", nämlich eines Muskels und einer Drüse.

Beim Muskel äußert sich die Erregung besonders auffällig in seiner mit gewisser mechanischer Energie erfolgenden Verkürzung (Kontraktion) nebst Wärme- und Elektrizitätsproduktion, worauf beim Nachlassen des Reizes die Wiederverlängerung (Erschlaffung, Expansion) folgt. Betrachten wir diese Vorgänge genauer, so finden wir, daß die Kontraktion auch mit einer vermehrten Zersetzung und Ausscheidung von Stoffen verbunden, also überhaupt der Ausdruck einer erhöhten Dissimilierung ist. Und da nach Abschluß des Expansionsprozesses die ganze Schwankung der stationären Prozesse vorüber, also wieder Gleichgewicht vorhanden ist, so liegt es nahe anzunehmen, daß dieses durch eine Verstärkung solcher Prozesse wieder hergestellt wird, welche die Folgen der erhöhten Dissimilierung kompensieren, nämlich eine Verstärkung der Assimilierung. Daß die letztere von selbst auf die vorausgehende Verstärkung der Dissimilierung usw. folgt, ist als ein Ausdruck der „inneren Selbststeuerung" der Lebensprozesse anzusehen.

Analoge Verhältnisse wie bei den Muskeln finden wir auch bei anderen „kontraktilen" lebendigen Systemen, nämlich bei formwechselnden („rhizopodoiden", „amöboiden") Protoplasmakörpern (Amöben, Foraminiferen, Heliozoen, Radiolarien, Leukocyten, Myxomyceten usw.) und bei Flimmerzellen (Infusorien, Flimmerepithelzellen, Geißelbakterien, Schwärmsporen usw.). Diese Systeme zeigen gegenüber dem Muskel im allgemeinen den Unterschied, daß bei ihnen schon unter Bedingungen, wo andere Systeme wie z. B. der Skelettmuskel in „Ruhe" und „Gleichgewicht" sind, teils in unregelmäßigem, teils in regelmäßigem Wechsel Bewegungen, also physiologische Schwankungen, vorhanden sind; eine Erscheinung, die wir in ähnlicher Weise auch beim Herzmuskel, beim Atmungszentrum usw. beobachten. Bei diesen Systemen bewirken dann noch weiter hinzukommende Reize bestimmte Aenderungen der ohnedies schon stattfindenden „spontanen" oder „automatischen" Bewegungen; wobei diese letzteren dann in „Reizbewegungen" übergehen oder auch „Hemmungen" herbeigeführt werden.

Diese Beeinflussung der „spontanen" Bewegungen durch Reize führt unter Umständen zu „Richtungsbewegungen" oder „Taxien", d. h. der Erscheinung, daß die lebendigen Systeme sich zur „Reizquelle" hin- oder von ihr wegbewegen; im ersteren Falle wird die „Taxis" als positiv, im letzteren als negativ bezeichnet. Solche Taxien werden durch alle Reizgattungen, wie mechanische, thermische, chemische, elektrische und elektromagnetische (Licht-) Reize hervorgerufen, wodurch dann entsprechend eine positive oder negative Barotaxis,

Thermotaxis, Chemotaxis, Galvanotaxis und Phototaxis, zum Teil in verschiedenen spezielleren Formen, zustande kommt. Diese Richtungsbewegungen veranschaulichen die früher genannte ökologische Bedeutung der physiologischen Schwankungen der stationären Prozesse im allgemeinen in sehr augenfälliger Weise.

Bei der Drüse, als dem Repräsentanten der Systeme mit „vegetativem" Charakter, äußert sich die Erregung besonders sichtbar in der stofflichen Erscheinung der Sekretbildung. Bei näherem Zusehen findet man aber auch gleichzeitige energetische Aenderungen, nämlich Produktion von Wärme, Druckenergie und Elektrizität. Im übrigen gilt auch hier für die Wiederherstellung des Stoff- und Energiegleichgewichtes ganz Aehnliches wie für den Muskel.

Und ebenso wie bei den „animalen" Systemen gibt es auch bei den „vegetativen" solche, bei denen schon unter Bedingungen, wo andere Systeme in „Ruhe" sind, eine Sekretproduktion stattfindet, nämlich bei den „kontinuierlich sezernierenden" Drüsen (Leber, Schleimdrüsen usw.); hier zeigt sich die Wirkung des hinzukommenden Reizes dann meistens in einer Verstärkung der Sekretbildung.

Im Gegensatze zur Erregung besteht die als „Lähmung" bezeichnete Schwankung in einer Herabsetzung der stofflich-energetischen Prozesse des lebendigen Systems, die unter verschiedenen Bedingungen in verschiedener Weise zustande kommt; als ein besonders prägnantes Beispiel sei nur an die Wirkung der Narkotika erinnert.

Die „Hemmung" endlich ist dadurch ausgezeichnet, daß eine schon bestehende Erregung durch gewisse Reize vermindert oder aufgehoben wird; das klassische Beispiel hierfür ist die Hemmung der Herzbewegungen durch die Reizung des Nervus vagus. Ferner sei als sehr häufige Erscheinung erwähnt die Hemmung in Erregung befindlicher Neurone durch Reize, die ihnen von anderen Neuronen zugeleitet werden.

$\gamma\gamma$) Die fortschreitenden Aenderungen des lebendigen Systems (Entwickelung). Hierher gehört einerseits die Entwickelung des Individuums oder Ontogenie, und andererseits die Entwickelung der Art (Spezies) oder Phylogenie. Diese ist zwar keine unmittelbar festzustellende Tatsache, wie die Ontogenie; doch ergibt sie sich mit solcher Sicherheit aus unzähligen einschlägigen Erfahrungen, daß sie wie eine Tatsache behandelt werden kann. Danach haben wir anzunehmen, daß die komplizierteren „höheren" Organismen im allgemeinen aus einfacheren „niedrigeren" durch fortschreitende Entwickelung hervorgegangen sind und daß auch jetzt und künftig die Gesamtentwickelung des Organismenreiches in derselben Weise weitergeht, wie es die Deszendenzlehre (Abstammungslehre, Entwickelungslehre) ausdrückt. Teils in das Gebiet der Ontogenie, teils in das der Phylogenie gehören die Tatsachen und Probleme der Fortpflanzung und Vererbung.

Im Gebiete der Phylogenie finden wir zwei Hauptprobleme, nämlich das von der ersten Entstehung des Lebendigen und das vom Zustandekommen des Fortschreitens in der Stammesentwickelung. Und hinsichtlich dieser interessieren uns besonders die Fragen, wie es zu erklären ist, daß dieser Fortschritt im allgemeinen vom Einfacheren zum Komplizierteren geht und wie sich hierbei die „primär-zweckmäßigen" Eigenschaften, die schon die allereinfachsten lebendigen Systeme zeigen, zu den „sekundär-zweckmäßigen" Eigenschaften der komplizierteren Organismen und wie sich die „nicht-zweckmäßigen" Eigenschaften weiter entwickelt haben. Für alle diese phylogenetischen Probleme sind wir ganz vorwiegend auf Hypothesen angewiesen, von denen später kurz die Rede sein wird.

Von Tatsachen und Problemen der Ontogenie sind hauptsächlich zu nennen: die „Amphimixis" d. h. Vermischung fortpflanzungsfähiger lebendiger Systeme; ferner die ontogenetische Entwickelung vom Eistadium bis zum natürlichen Tod (hierüber weiter unten S. 80f.), mit den Erscheinungen des Wachstums, der Zellteilung, Zelldifferenzierung, der Anordnung der Zellen zu Geweben, Organen, Organsystemen usw.; endlich die zum Teil in das Gebiet der Phylogenie gehörenden Erscheinungen der Vererbung.

Zwischen den Erscheinungen der phylogenetischen und ontogenetischen Entwickelung bestehen gewisse Beziehungen, die durch das „biogenetische Grundgesetz" ausgedrückt werden.

β) Das latente Leben und seine Bedingungen. Wenn man von besonders günstigen Bedingungen eines lebendigen Systems durch Verminderung der Nahrung, durch Abkühlung usw. schrittweise zu den ausschließlich für die Erhaltung notwendigen übergeht, so findet man im allgemeinen eine entsprechende Abschwächung der Lebensprozesse. Ist die Grenze der letztgenannten Bedingungen erreicht, so erfolgt bei manchen lebendigen Systemen, ohne daß der Tod eintritt, unter Umständen eine solche Abnahme der Prozesse, daß nur noch Spuren oder auch nichts mehr von Lebensvorgängen festzustellen ist; im ersteren Falle spricht man wohl von „vita minima", im letz-

teren von „latentem Leben“. „Vita minima“ und „latentes Leben“ kommen einerseits bei solchen Systemen vor, die normalerweise nur aktuelles Leben zeigen, wie z. B. bei erwachsenen Tieren, wo wir dann wohl von „Scheintod“ reden; andererseits finden wir sie bei Systemen, wo sie einen physiologischen Zustand darstellen, wie besonders bei noch nicht keimenden pflanzlichen Samen.

Es ist eine wichtige und vieldiskutierte Frage, ob die Lebensprozesse vollständig stillstehen können, ohne daß das System die Lebensfähigkeit einbüßt, d. h. die Fähigkeit, unter geeigneten Bedingungen wieder zu aktuellem Leben zu erwachen.

In dieser Hinsicht ist festgestellt worden, daß z. B. ganz trockene Pflanzensamen bei monatelanger Untersuchung, die auch den geringsten Stoffwechsel hätten aufdecken müssen, nicht die kleinste Spur eines solchen erkennen ließen. Trotzdem waren diese Samen keimfähig geblieben. Und es scheint sicher zu sein, daß sich eine solche Keimfähigkeit über hundert Jahre erhalten kann. Aber nicht Tausende von Jahren; denn die angebliche Keimfähigkeit des vielbesprochenen Mumienweizens beruhte auf Täuschung. Aus allen einschlägigen Erfahrungen kann man wohl folgendes schließen: In ganz trockenen Samen verlaufen die Prozesse außerordentlich langsam, so daß unter Umständen erst nach Jahrhunderten die Aenderungen des Systems merklich werden (Erlöschen der Keimfähigkeit); ein völliger Stillstand der Prozesse liegt in dieser Zeit nicht vor. Ein solcher ist erst dann anzunehmen, wenn die reagierenden Massen des Systems sich bereits im energieärmsten (nach dem zweiten Hauptsatz der Energetik) Zustande befinden, was jedenfalls erst nach dem Erlöschen der Keimfähigkeit der Fall sein kann. Bis zur Erreichung des energieärmsten, stabilen Endzustandes des Systems müssen also noch Aenderungen im System vor sich gehen, wenn auch sehr langsame. Aehnliches gilt im allgemeinen auch für die berühmten Fälle von „Scheintod“ der Bärentierchen (Macrobiotus), Rädertierchen (Rotatorien) usw., die in völlig eingetrocknetem Zustande jahrelang ohne die geringsten Spuren von Leben verharren und doch bei Benetzung mit Wasser wieder zu aktuellem Leben erwachen können, ein Vorgang, der als „Anabiose“ bezeichnet wird.

Gegenüber diesen Fällen von „latentem Leben“ handelt es sich beim „Scheintod“ der höheren Tiere und des Menschen höchstwahrscheinlich stets um eine bei genauerer Untersuchung feststellbare „vita minima“. Der scheintote Mensch besitzt, wie es scheint, noch stets eine Spur von Herztätigkeit und Blutkreislauf und sonstige nachweisbare „vita minima“; wenn nämlich der Kreislauf für etwas längere Zeit völlig verschwunden ist, dürfte das Leben unwiderruflich verloren sein (siehe hierüber auch unten). Dasselbe gilt wohl auch für die indischen Fakire, die sich lebendig (aber ohne völligen Luftabschluß) einmauern lassen und so bis sechs Wochen lang in einem willkürlich eingeleiteten Zustande des Scheintodes verharren können.

γ) Das Sterben und seine Bedingungen. Von „Sterben“ oder „Nekrobiose“ im weiteren Sinne sprechen wir, wenn die Lebensprozesse sich in zunehmendem Maße derart „pathologisch“ verändern, daß innerhalb relativ kurzer Zeit der Tod des Systems, d. h. ein völliges Aufhören der charakteristischen („physiologischen“) stationären Lebensprozesse, eintritt. Das geschieht entweder dann, wenn die (notwendigen) Erhaltungsbedingungen des lebendigen Systems relativ schnell und dauernd erheblich unterschritten werden, in welchem Falle der Tod ein „gewaltsamer“ („nicht-natürlicher“) wird; oder der Tod erfolgt trotz günstigen äußeren und „physiologischen“ inneren Bedingungen des Systems als „normaler“ Abschluß seiner ontogenetischen Entwickelung, als „natürlicher“, „physiologischer“ Tod.

Doch ist niemals eine strenge Grenze zwischen dem „physiologischen“ Leben und der „Nekrobiose“ zu ziehen, da beim Zustandekommen der letzteren die Lebenserscheinungen ganz allmählich abnehmen und abnorm werden, so daß der Punkt nicht bezeichnet werden kann, wo das physiologische Leben aufhört und die Nekrobiose anfängt. Das wird besonders dadurch erschwert, daß selbst ziemlich weitgehende, zum Tode hinleitende pathologische Aenderungen der Lebenserscheinungen stattfinden können, die aber bei rechtzeitiger Verwandlung der sie bewirkenden ungünstigen Bedingungen in besonders günstige wieder rückgängig gemacht werden können. Daher wäre es vielleicht zweckmäßig, erst von dem Augenblicke an von „Nekrobiose“ zu sprechen, wo die zum Tode hinleitenden pathologischen Aenderungen der Lebensprozesse so weit gegangen sind, daß sie selbst unter den günstigsten Bedingungen nicht mehr rückgängig zu machen sind.

Das Sterben und der Tod eines lebendigen Systems ist entweder partiell oder total. Es können nämlich verschiedene Zellkomplexe eines vielzelligen Organismus absterben, ohne daß das Ganze zugrunde geht. Ja, es kann sogar ein Stück einer Zelle sterben, während der Rest weiterlebt; hier sei besonders auf die wichtige Tatsache hingewiesen, daß ein Stück Protoplasma, das des Zellkerns völlig beraubt ist, dem Tode ver-

fallen ist, während die Anwesenheit selbst eines Stückes des Zellkernes genügt, um das lebendige System zu erhalten und zu regenerieren. Häufig aber leitet der partielle Tod eines Systems seinen totalen ein: Wenn beim Menschen z. B. ein für seine Erhaltung unentbehrliches Organsystem nicht mehr ausreichend funktioniert (Schädigung beider Nieren, während eine gesunde Niere genügt), so beginnt mit dem hier einsetzenden partiellen Sterben das totale, welches zuerst die am wenigsten widerstandsfähigen Zellkomplexe (z. B. das Zentralnervensystem) ergreift, während im Verlaufe einer größeren Anzahl von Stunden der Reihe nach der Tod der anderen Teile nachfolgt.

Auf das Zustandekommen des „nicht natürlichen" („gewaltsamen") Todes, der entweder durch eine einmalige schwere Schädigung oder durch wiederholte kleinere Schädlichkeiten bedingt sein kann, braucht nicht näher eingegangen zu werden. Dagegen sei in Kürze dreier verschiedenen Ansichten gedacht, die über das Zustandekommen des „natürlichen" Todes vertreten werden: Nach der einen, noch ziemlich verbreiteten Vorstellung kommt der natürliche Tod, ähnlich dem nicht-natürlichen, durch eine Häufung unzähliger kleiner, unvermeidlicher Schädlichkeiten zustande; woraus man den höchst bedenklichen Schluß ziehen müßte, daß der Mensch bei Fernhaltung aller Schädlichkeiten überhaupt nicht zu sterben brauche. Eine andere Anschauung ist die, daß der Organismus sich im Laufe des Lebens „a b n u t z e", etwa wie eine Dampfmaschine, und dadurch zugrunde gehe. Gegen die genannten beiden Ansichten spricht schon sehr nachdrücklich die Tatsache, daß manche Organismen nur eine sehr kurze Lebensdauer haben (Eintagsfliege usw.), so daß hier für eine Anhäufung von Schädlichkeiten und eine Abnutzung keine Zeit wäre. Am einleuchtendsten ist daher die Vorstellung, daß der natürliche Tod der selbst unter den günstigsten Bedingungen sich einstellende natürliche Abschluß des ontogenetischen Entwickelungsprozesses ist, der schließlich, wie jeder Prozeß, zu einem stabileren Endzustand des Systems führt; ob dies durch eine Anhäufung von „Schlakken" geschieht, die durch die Lebensprozesse erzeugt werden, oder ob der lebendige Stoff- und Energiewechsel sonstwie in weniger stationäre Geleise gerät, muß unentschieden bleiben.

Es sei hier noch darauf hingewiesen, daß bei den mehrzelligen Organismen die „K e i m s u b s t a n z", d. h. der Teil des lebendigen Systems, aus dem Eier und Samen gebildet werden, „p o t e n t i e l l e U n s t e r b l i c h k e i t" besitzt, eine Fähigkeit, die im allgemeinen dem größten Teil der Zellsubstanz der einzelligen Organismen zukommt.

3b) D i e p s y c h i s c h e n E i g e n s c h a f t e n d e s l e b e n d i g e n S y s t e m s. Psychische Eigenschaften, die mit denen des Menschen noch einigermaßen zu vergleichen sind, können wir per analogiam nur bei Tieren mit Nervensystem und Sinnesorganen annehmen. Aber schon von dem primitiven psychischen Leben der niederen Nerventiere vermögen wir uns kaum eine Vorstellung zu machen, und das gilt erst recht von etwaigen „psychischen" Vorgängen der niedersten Tiere und der Pflanzen.

Bezüglich der wichtigen Frage nach den Beziehungen zwischen den physischen und psychischen Prozessen des lebendigen Systems sei nur bemerkt, daß überall da, wo eine Antwort auf diese Frage möglich war, sich feststellen ließ, daß ebenso wie die physischen Erscheinungen voneinander abhängig sind, so auch die psychischen Prozesse von den physischen; an bestimmte Nervenprozesse z. B. sind bestimmte psychische Prozesse gebunden, wie die Tatsachen der „spezifischen Energie" der Sinnesnerven und überhaupt der „Lokalisation" der „psychischen Funktionen" lehren. Ein paar weitere Worte über das Verhältnis des Physischen und Psychischen werden später noch Platz finden.

4. Zur Erklärung der Lebenserscheinungen. Theorie und Wesen des Lebens. Die Erklärungsversuche im Bereich des Lebendigen sind entweder m o n i s t i s c h, d. h. auf einheitlichen Prinzipien beruhend, die in gleicher Weise für die organismische und anorganismische Natur gelten; oder die Erklärungsversuche sind d u a l i s t i s c h und gebrauchen somit verschiedene Prinzipien für die lebendigen und die anorganismischen Systeme, wie dies hauptsächlich der V i t a l i s m u s und N e o v i t a l i s m u s tut. Weitaus die meisten der heutigen Biologen sind Anhänger des Monismus. Sehr viele darunter freilich nur ihrer Absicht nach und nicht in Wirklichkeit; denn der von ihnen vertretene M a t e r i a l i s m u s in den verschiedenen Formen, die E. d u B o i s - R e y m o n d, H a e c k e l und O s t w a l d geprägt haben, ist strenggenommen keine einheitliche Auffassung, kein Monismus, da sie das „Physische" und „Psychische" nicht einheitlich erfassen.

Da die monistischen Erklärungsversuche der Lebenserscheinungen in erster Linie von Interesse sind und die Irrtümer des Vitalismus auf der Hand liegen (vgl. S. 87 f.), so wollen wir uns hier hauptsächlich an jene halten.

4a) M o n i s t i s c h e E r k l ä r u n g s v e r s u c h e. Eine monistische Auffassung des Lebens läßt sich auf zweierlei Weise begründen und ausarbeiten: Erstens durch den Nachweis, daß auch in anorganismischen Systemen viele solche Erscheinungen vor-

kommen, die verschiedenen besonders erklärungsbedürftigen Lebenserscheinungen sehr ähnlich sind; und zweitens durch den Nachweis, daß alle Lebenserscheinungen, auch die, für die das eben Gesagte vielleicht nicht gilt, doch aus den Prinzipien der anorganismischen Natur abzuleiten sind oder doch nicht in Widerspruch mit ihnen stehen. Diese beiden Nachweise wollen wir betrachten.

α) Aehnlichkeit einzelner Lebenserscheinungen mit Erscheinungen anorganismischer Systeme. „Nachahmung" von Lebenserscheinungen. Eine erhebliche Anzahl von Erscheinungen, die als besonders charakteristisch für das Leben angesehen werden und wofür Erklärungen nach Art derjenigen der anorganismischen Prozesse besonders von den Vitalisten für ausgeschlossen erachtet werden, hat man auch in anorganismischen Systemen aufzufinden vermocht. So ist es gelungen, an Oeltropfen, Oelseifen-Emulsionen und verschiedenen anderen Flüssigkeiten (speziell sei noch an die vielgenannten „flüssigen" Kristalle erinnert) die verschiedenen Formen der amöboiden Bewegung (vgl. S. 78) zu beobachten. Ferner hat man gefunden, daß Flüssigkeitstropfen unter bestimmten Bedingungen ganz ähnlich wie Amöben usw. Stoffe auswählen, aufnehmen und abgeben (vgl. S. 74f.). Zur Erläuterung diene folgendes Beispiel: Ein mit Schellack überzogener Glasfaden wird von einem in Wasser befindlichen Chloroformtropfen aufgenommen, sobald er ihn berührt; der einverleibte Faden wird dann seiner Schellackrinde beraubt und wieder ausgestoßen, wie die unverdaulichen Reste eines Nahrungskörpers durch eine Amöbe (vgl. Rhumbler Physikalische Analyse von Lebenserscheinungen der Zelle Arch. f. Entwickelungsmechanik Bd. 7 1898). Da dieser Prozeß gerade nur bei Schellack und wohl einigen ähnlichen Stoffen zu erzielen ist, so liegt hier auch eine Auswahl vor. Ferner kann in ähnlicher Weise auch Chemotaxis (vgl. S. 78f.) nachgeahmt werden, ferner die eigenartigen Strahlungsfiguren in Teilung befindlicher Zellen und vieles andere.

Durch das eben Dargelegte soll nicht etwa bewiesen werden, daß auch die entsprechenden Lebenserscheinungen in derselben Weise zustande kommen; wohl aber ist dadurch bewiesen, daß derartige Bewegungserscheinungen und ihre Erfolge zum Zustandekommen keiner Faktoren bedürfen, die nicht auch in anorganismischen Systemen vorhanden sind. Mehr soll daraus nicht gefolgert werden.

Wir sind zurzeit noch weit davon entfernt, alle Lebenserscheinungen in derartiger Weise nachahmen zu können, und vor allem auch davon, eine größere Anzahl von solchen, besonders auch von stofflichen Lebenserscheinungen, gleichzeitig in demselben System zu erzielen.

β) Prinzipielle Begründung der Berechtigung monistischer Erklärungen. Wenn wirklich die Prinzipien der exakt-naturwissenschaftlichen Erklärungen auch für das Lebendige ausreichen, so müssen

1. die Elementarbestandteile der lebendigen Systeme im wesentlichen die gleichen sein wie die der anorganismischen Systeme und dasselbe muß gelten für die Gesetzmäßigkeiten, nach denen sich die Bestandteile zu Komplexen verbinden und nach denen sich diese Komplexe bei Prozessen ändern;

2. muß es möglich sein, die Lücken zwischen den Tatsachen ebenso wie bei allen anderen exakt-naturwissenschaftlichen Erklärungen in einfachster und vollständigster Weise durch hypothetisch angenommene Elementarbestandteile und Gesetzmäßigkeiten, die in den Zusammenhang passen, so auszufüllen, daß

3. jede Erscheinung des lebendigen Systems durch die tatsächlich festgestellten und hypothetisch angenommenen Elementarbestandteile, Komplexe und Gesetzmäßigkeiten des Systems und seiner Umgebung (äußeren Bedingungen) eindeutig bestimmt erscheint.

Im wesentlichen ist dies alles der Fall und prinzipielle Schwierigkeiten lassen sich nirgends nachweisen. Für die Erklärungen der „physischen" Lebenserscheinungen reichen im Prinzip die von der Physik und Chemie angenommenen Elementarbestandteile (Atome der chemischen Elemente, Moleküle usw.) und Gesetzmäßigkeiten vorläufig[1]) aus. Besonders sei noch hervorgehoben, daß dies auch für die beiden allgemeinsten bisher formulierten Gesetzmäßigkeiten gilt, nämlich die beiden Hauptsätze der Thermodynamik und Energetik (bezüglich der Gültigkeit des zweiten Hauptsatzes siehe P. Jensen Ueber die Gültigkeit des zweiten Hauptsatzes der Energetik in der Physiologie. Vortrag Allgem. medizin. Zentralzeitung 1908 No. 5).

Zur Erklärung der „psychischen" Erscheinungen und ihres Verhältnisses zu den physischen genügt freilich die der heutigen Physik und Chemie zugrunde liegende mate-

[1]) Das sind freilich durchaus noch keine endgültigen Ergebnisse, da bei kritischer Betrachtung auch die Atome, Moleküle usw., kurz, die Elemente der materialistischen Anschauung, sich nur als Symbole darstellen, die später einmal durch anderes ersetzt werden müssen.

rialistische Anschauung nicht und dürfte am besten durch den modernen Positivismus ersetzt werden, zu dessen Entwickelung in erster Linie E. Mach den Anstoß gegeben hat (siehe besonders E. Mach Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis des Physischen zum Psychischen 6. Aufl. Jena 1911 und Erkenntnis und Irrtum Leipzig 1905; J. Petzoldt Das Weltproblem vom positivistischen Standpunkte aus. In Aus Natur und Geisteswelt. Leipzig 1906). Die „Einwände", die neuerdings z. B. von M. Planck an verschiedenen Orten gegen diese Anschauung und ihren ersten Vertreter erhoben worden sind, verdanken ihre Existenz nur einer ganz oberflächlichen Behandlung dieser Probleme. Nach Mach erweist sich die prinzipielle Zweiteilung der Welt in eine „physische" und eine „psychische" als eine Täuschung, durch deren Erkennung eine wirklich einheitliche Auffassung erst möglich wird.

γ) Erklärungsversuche der wichtigsten Gruppen von Lebenserscheinungen. Wir wollen hier auf die Theorien der stationären Prozesse, ihrer physiologischen Schwankungen, der Entstehung und der Entwickelung der lebendigen Systeme kurz eingehen. Unter „Theorie" eines Vorganges verstehen wir dabei eine vereinfachte Nachbildung des ganzen Vorganges in Gedanken, bei der alles Nebensächliche, in verschiedenen Fällen Wechselnde, weggelassen und nur das allen Gemeinsame berücksichtigt ist. Eine solche Theorie definiert dann zugleich in ausführlicherer Weise den Begriff und das „Wesen" des Lebens.

Für das Verständnis der stationären Prozesse ist es in erster Linie erforderlich, eine Vorstellung zu gewinnen von den Faktoren, die den lebendigen Stoff- und Energiewechsel im Gang erhalten, von denen zugleich anzunehmen ist, daß sie den Hauptunterschied zwischen dem lebendigen und toten organismischen System bedingen. Wenn man sich diese Sachlage klarmacht, so wird man wohl stets zu Vorstellungen nach Art der Biogenhypothese (vgl. S. 68) geführt; doch ehe wir auf diese eingehen, sei bemerkt, daß derartige Anschauungen durchaus nicht allgemein anerkannt und daß vielmehr zur Erklärung des Stoff- und Energiewechsels sich im allgemeinen zwei Arten von Hypothesen gegenüberstehen, die man als „Maschinen-Hypothesen" und „Selbstzersetzungs-Hypothesen" (Biogenhypothese) bezeichnen kann.

Nach den ersten ist das lebendige System eine Maschine mit relativ unveränderlichen Maschinenteilen. Sie wird durch die Nahrungsstoffe im Betrieb erhalten und diese dabei zu den Stoffwechselprodukten verbrannt oder gespalten, was mit Hilfe von Enzymen geschieht. Welche Teile des lebendigen Systems aber die Maschine darstellen, wie diese durch die Betriebsenergie in Bewegung gesetzt werden und wie die verschiedenen Erscheinungen der Reizbarkeit, Leitungsfähigkeit, Kontraktilität usw. zustande kommen, das ergibt sich aus dieser Hypothese nicht und würde neue Hilfshypothesen erfordern.

Erheblich einfacher und befriedigender lassen sich die angedeuteten Fragen mittels der Selbstzersetzungs-Hypothesen nach Art der Biogenhypothese beantworten; besonders auch erleichtert sie die Behandlung des lebendigen Systems als „chemisches System". Nach der Biogenhypothese, der man recht verschiedene Formen geben kann, sind die Teile des lebendigen Systems, die man etwa als „Maschinenteile" im weiteren Sinne (= „Maschinenbedingungen" vgl. S. 71) bezeichnen kann und zu denen besonders die Biogensubstanzen gehören (vgl. S. 68), durchaus nicht unveränderlich, sondern am Stoffwechsel teilnehmende Bestandteile des lebendigen Systems. Und die Biogensubstanzen sind es, die den Stoff- und Energiewechsel im Gang erhalten, indem sie einerseits eine so große chemische Labilität besitzen, daß sie schon bei normaler Temperatur des Systems von selbst zerfallen, und indem andererseits im System die Bedingungen für eine stetige Neubildung von Biogen vorhanden sind; die letztere erfolgt aus den Nahrungsstoffen und es ließe sich einiges dafür anführen, daß zwischen diesen und dem Biogen usw. ein echtes chemisches Gleichgewicht bestehe (vgl. S. 73). Ein erheblicher Energieaufwand für die Synthese des Biogens dürfte kaum erforderlich sein, jedenfalls nicht entfernt ein solcher wie für die Synthese von Kohlehydraten, Fetten und Eiweißkörpern durch die Pflanzen.

Der Vorgang der Zersetzung des Biogens mit allem, was sie im Gefolge hat, ist die Dissimilierung (vgl. S. 75), der Aufbau von Biogen usw. die Assimilierung.

Wenn die stationären Lebensprozesse in der „Ruhe" vonstatten gehen, so sind Assimilierung und Dissimilierung gleich stark; dann herrscht Stoff- und Energiewechsel-Gleichgewicht. Die Aufnahme und Abgabe von gelösten Stoffen durch lebendige Systeme, die keine merklichen Bewegungen zeigen, läßt sich auf chemische Affinitäten usw., unterstützt durch Differenzen des hydrostatischen und osmotischen Druckes, zurückführen. Die innere Selbststeuerung kann aus dem chemischen Gleichgewicht (vgl. P. Jensen Ztschr. f. allg. Physiol. Bd. 8 S.

335 f. 1908) zwischen Biogen usw und „Assimilierungsmaterial“ (Nahrungsstoffen) abgeleitet werden. Wenn man so eine Möglichkeit sieht, wie etwa die Vorgänge der Nahrungsaufnahme, Assimilierung, inneren Selbststeuerung, Dissimilierung und Ausscheidung von Stoffwechselprodukten zustande kommen können, so hat man damit auch ein Verständnis gewonnen für die Betätigung der wichtigen und charakteristischen Fähigkeit der Selbsterhaltung des lebendigen Systems und damit der Quintessenz der „organischen Zweckmäßigkeit“. (Vgl. S. 67 und 69 ff. Ueber das Verhältnis der „organischen Zweckmäßigkeit“ zur Selbsterhaltung siehe P. Jensen Organische Zweckmäßigkeit Entwickelung und Vererbung vom Standpunkte der Physiologie. Jena 1907).

Bei den physiologischen Schwankungen der stationären Prozesse ändert sich das Verhältnis von Assimilierung und Dissimilierung. Hier sei als Beispiel nur die Erregung behandelt. Sie ist dadurch ausgezeichnet, daß zuerst die Dissimilierung beschleunigt und auch qualitativ verändert ist und daß dann, beim Nachlassen des Reizes, durch die „innere Selbststeuerung“ eine Beschleunigung der Assimilierung folgt. Aus den stofflichen Aenderungen bei der Erregung lassen sich unter geeigneten Voraussetzungen über die physikalischen Eigenschaften und den feinsten morphologischen Aufbau der verschiedenen lebendigen Systeme dann auch ihre verschiedenen energetischen und morphologischen Aenderungen (vgl. die Beispiele von Muskel und Drüse S. 78 f.) bei der Erregung im Prinzip ableiten. Bei den Systemen mit physiologischen Schwankungen spielen diese zugleich mit den oben genannten Faktoren eine besonders wichtige Rolle bei der Selbsterhaltung, indem die Nahrungsstoffe und Exkretstoffe als Reize auf das System wirken und so, je nach der Art des Systems, auf sehr verschiedenen Wegen Bewegungen usw. auslösen, die zur Aufnahme des Assimilierungsmaterials und zur Abgabe der Exkrete führen.

Für die Erklärung der phylogenetischen Entstehung und Entwickelung der Organismenwelt haben wir leider fast gar keine, für die der ontogenetischen Entwickelung verhältnismäßig viel zu wenig tatsächliche Anhaltspunkte und sind daher in großem Umfange auf Hypothesen angewiesen. Ehe wir auf die Theorien dieses Gebietes eingehen, sei bezüglich der Entstehung des Lebens zunächst bemerkt, daß diese nach der Ansicht mancher Forscher überhaupt kein Problem ist, indem man gegenüber der Vorstellung, daß das Leben auf der Erde (wie auch vielleicht auf anderen Gestirnen) einmal entstanden sei, wohl auch die Meinung vertreten hat, daß neben der anorganismischen Materie immer, ohne Unterbrechung, im Weltenraum auch lebendige Organismen existiert haben; das Lebendige sei ebensowenig entstanden wie das Anorganismische. Eine derartige Annahme macht die Kosmozoentheorie in ihrer ursprünglichen Form. Danach sollen die von jeher dagewesenen lebendigen Keime oder Kosmozoen überall im Weltenraume umhergetragen werden und sich jedesmal auf den Gestirnen entwickeln, wo sie günstige Bedingungen finden. Früher galten hauptsächlich Meteore als Ueberträger solcher Keime; neuerdings hat Arrhenius herausgefunden, daß der elektromagnetische „Strahlungsdruck“ ein besonders geeignetes Transportmittel für die kleinen Kosmozoen sei, und hat so wieder die Aufmerksamkeit auf diese Theorie gelenkt. Die Kosmozoentheorie ist aber, abgesehen von anderen Bedenken, schon deshalb sehr unbefriedigend, weil wir auf Grund aller unserer Erfahrungen gewohnt sind uns stets vorzustellen, daß das Kompliziertere, d. h. in diesem Falle die lebendigen Systeme, sich aus dem Einfacheren, d. h. einer Materie nach Art der heutigen anorganismischen entwickelt habe. Da wir durchaus keinen einleuchtenden Grund haben, hier von dieser Auffassung abzuweichen, so dürfen wir jedenfalls die Frage nach der Entstehung des Lebendigen nicht umgehen. Diese Frage kann zunächst in zweierlei Form gestellt werden, nämlich: Ist das Leben unserer Erde auf ihr selbst entstanden oder ist es anderswo entstanden und von dort zu uns herübergetragen? Zweifellos ist es das Nächstliegende und Einfachste, jenes anzunehmen und wir wollen daher auf diese Frage allein hier eingehen. In der Tat knüpfen auch an diese Frage alle die Herkunft des Lebens auf unserem Planeten betreffenden Theorien außer der genannten Kosmozoentheorie an.

Aber fast alle diese Theorien machen den Fehler, daß sie die innige Zusammengehörigkeit der Probleme der Entstehung und der Entwickelung nicht richtig erfaßt haben. Das zeigt sich schon darin, daß bei den Theorien der Entstehung die Entwickelung meistens kaum berücksichtigt wird und umgekehrt. Der Grund hierfür liegt hauptsächlich darin, daß die Kernpunkte der Probleme der Entstehung und Entwickelung nicht richtig erkannt sind. Denn das Entstehungsproblem wird gewöhnlich so formuliert: Wie und unter welchen Bedingungen konnte ein System von der chemischen Beschaffenheit des lebendigen Systems von selbst entstehen? Diese Fragestellung enthält aber das Wesentliche nicht und muß vielmehr lauten: Wie und unter welchen Be-

dingungen konnten stationäre, fortschreitend-veränderliche (entwickelungsfähige) Prozesse, die an morphologisch abgeschlossene aber chemisch-energetisch unfreie Systeme gebunden und so beschaffen waren, daß die heutigen Lebensprozesse und lebendigen Systeme sich daraus zu entwickeln vermochten, von selbst entstehen und sich entwickeln? (über diesen Komplex von Problemen siehe P. Jensen Organische Zweckmäßigkeit Entwickelung und Vererbung. Jena 1907). Und da man, wie oben angedeutet, bei den üblichen Erklärungsversuchen der Entstehung des Lebens auf das Problem der phylogenetischen Entwickelung und der Entwickelungsfähigkeit nicht die erforderliche Rücksicht genommen hat, so ist man, in den meist anerkannten Theorien, darauf verfallen, die „Triebkraft" für die fortschreitenden Aenderungen der Phylogenie ganz vorwiegend in äußere Faktoren zu verlegen, was als völlig verfehlt bezeichnet werden muß.

Es seien zunächst die bekanntesten der Entstehungstheorien, die keine erhebliche Rücksicht auf das Problem der Entwickelung nehmen, in Kürze charakterisiert.

Am verbreitetsten ist wohl die Theorie von der „Urzeugung" (Generatio spontanea oder aequivoca, Abiogenesis usw.). Hiernach sind die ersten lebendigen Systeme unter den Bedingungen entstanden, die in jener Periode der Erdentwickelung vorhanden waren, als sich der Wasserdampf der Atmosphäre in tropfbar-flüssiger Form auf der Oberfläche des Planeten niederzuschlagen begann. Diese ersten lebendigen Organismen sollen als homogene „Eiweißklümpchen" ohne Zellkern („Moneren") den einfachsten noch heute vorkommenden lebendigen Systemen schon sehr ähnlich gewesen sein. Die einst vielerörterte Frage, ob auch in der Gegenwart noch eine Urzeugung stattfinde, wird jetzt ziemlich allgemein verneint. Nach einer derartigen Entstehungsgeschichte der Organismen, wonach diese gewissermaßen aus dem Wasser „auskristallisiert" sind, ist abgesehen von anderen Schwierigkeiten durchaus nicht zu verstehen, wie stationäre Prozesse mit Selbsterhaltungsfähigkeit („primärer Zweckmäßigkeit") und Entwickelungsfähigkeit entstanden sein sollen (vgl. auch den Artikel „Urzeugung").

Eine Modifikation dieser Urzeugungslehre ist im wesentlichen die von Allen, der auf die chemische Seite der Frage etwas näher eingeht und dem Stickstoff und seinen Beziehungen zum Sauerstoff die Hauptrolle in dem Prozeß der Entstehung des Lebendigen zuschreibt.

In einem wichtigen Punkte verschieden von der Urzeugungslehre sind die Anschauungen von Pflüger und Preyer. Beide verlegen den Ursprung des Lebens in viel frühere Zeiten der Erdentwickelung. Pflüger geht bis zur Glutzeit des Planeten zurück; mit dem damaligen ersten Auftreten von Cyanverbindungen, die Pflüger als die charakteristischen Atomgruppen seines „lebendigen Eiweißes" ansieht, ist nach ihm der Anfang des Lebens markiert. Nach dieser Vorstellung sind zum Unterschied von der Urzeugungslehre die ersten lebendigen Systeme noch sehr verschieden von den einfachsten heute lebenden. Auch hier sind die stationären Prozesse der ersten lebendigen Systeme viel zu wenig betont und ihrer Entwickelungsfähigkeit ist überhaupt kaum gedacht. Nach Preyer ferner soll die Erde schon von ihrem eigenen Ursprung an Leben gehabt haben, und zwar nennt er in einer bildlichen Ausschmückung und Erweiterung des Begriffes „Leben" die ganze Substanz der Erde in ihrem einstigen glühenden Zustande „lebendig", welche Bezeichnung aber für die ganze Theorie unwesentlich sein dürfte. Aus dieser „lebendigen" Ursubstanz sollen sich dann einerseits die heutigen Organismen andererseits die anorganismische Materie entwickelt haben. Stationäre Prozesse, Selbsterhaltungsfähigkeit („primäre Zweckmäßigkeit") und Entwickelungsfähigkeit als Charakteristika des Lebendigen sind auch hier nicht ausdrücklich berücksichtigt.

Im Anschluß an die genannten Entstehungstheorien seien auch die üblichen Entwickelungstheorien kurz charakterisiert. Wie schon erwähnt, verlegen diese Theorien die „treibende Kraft" der Entwickelung in die Außenwelt, da nun einmal unter ihren Voraussetzungen eine im lebendigen System selbst begründete Fähigkeit der Entwicklung vom Einfacheren zum Komplizierteren fehlt. Man kann daher diese Entwickelungstheorien gegenüber den „autogenetischen" Theorien von Nägeli, O. Hertwig u. a., von denen als „pseudoteleologischen" hier abgesehen werden kann, als „allogenetische" bezeichnen. Zu diesen gehören besonders die Darwinsche Selektionstheorie oder Lehre von der Naturzüchtung, die Lehre von Lamarck[1]) und Eimers Orthogenesistheorie. Sie alle nehmen im wesentlichen an, daß der Organismus etwas unbestimmt Variables sei und daß diese seine „universelle" Variabilität erst durch die in bestimmter Richtung fortschreitenden Aenderungen der äußeren Bedin-

[1]) Von neueren pseudoteleologischen Anschauungen, die an den Lamarckismus anknüpfen, wie die „Beseelungslehre" von Pauly, kann ebenfalls abgesehen werden.

gungen, welche die Erdentwickelung mit sich bringt, ebenfalls in bestimmte Richtung geleitet werde. Diese schwerwiegende Hypothese, die seit Dezennien von Darwinisten, Lamarckisten usw. kritiklos weitergetragen wird, ist bei näherer Betrachtung geradezu sinnlos. Wäre sie richtig, so müßte aus jedem Organismus phylogenetisch noch jeder andere hervorgehen können, wenn nur die entsprechenden äußeren Bedingungen hergestellt würden; also nicht nur müßte aus einem Saurier ein Vogel werden können, sondern auch umgekehrt aus einem Vogel ein Saurier und in letzter Konsequenz sogar aus einem Baum ein Säugetier und umgekehrt. Diese Konsequenz wird aber gewiß niemand zulassen wollen; denn hier drängt es sich jedem auf, daß einem Baume aus inneren Gründen die Entwickelungsfähigkeit fehlt, die zum phyletischen Uebergang in ein Säugetier erforderlich wäre. Also auf die Entwickelungsfähigkeit kommt es an; durch sie ist es auch bedingt, daß ontogenetisch aus einem menschlichen Ei stets nur ein Mensch und aus einem Pflanzensamen nur eine bestimmte Pflanze wird. Aus diesen Tatsachen folgt unabweislich, daß die ganze phylogenetische Entwickelung eine bestimmt gerichtete Entwickelungsfähigkeit voraussetzt, und zwar die Fähigkeit der Entwickelung vom Einfacheren zum Komplizierteren, der „primären Zweckmäßigkeit“ zur „sekundären“ usw. Und diese Entwickelungsfähigkeit muß in erster Linie erklärt werden. Wie sie dann unter dem Einfluß der äußeren Bedingungen und ihrer Aenderungen zur Entwickelung führt, das ist erst die zweite Frage. Daß in letzterer nicht der Kernpunkt des Problems liegt, lehrt schon der Vergleich mit der Ontogenie; aus einem Froschei z. B. wird unter allen möglichen Bedingungen, unter denen es sich überhaupt zu entwickeln vermag, stets nur ein Frosch; lassen die Bedingungen dies nicht zu, so entwickelt sich gar kein Organismus.

Fassen wir die Kritik der allogenetischen Entwickelungstheorien zusammen, so müssen wir sagen: Die üblichen Entstehungstheorien haben versäumt, die Grundlagen der Entwickelung, nämlich die Selbsterhaltungsfähigkeit (im besonderen die „primäre Zweckmäßigkeit“) und die im lebendigen System selbst begründete Fähigkeit der Entwickelung vom Einfacheren zum Komplizierteren festzustellen und zu erklären, und es mußte daher all das Versäumte nachher gewaltsam den äußeren Bedingungen aufgebürdet werden, wie dies die allogenetischen Entwickelungstheorien tun.

Gegenüber den bisher besprochenen als unzureichend erkannten Entstehungs- und Entwickelungstheorien ist von Jensen im Anschluß an Darlegungen von Fechner und Petzoldt eine die Entstehung und Entwickelung der Organismen zugleich umfassende Theorie ausgearbeitet worden, die von der früher angegebenen Charakteristik des lebendigen Systems ausgeht. Sie verweist auf jene theoretisch anzunehmende Urzeit der Erde und unseres Sonnensystems, wo die Elemente des Seienden eben anfingen, sich zu Komplexen zu vereinigen. Man darf sich vorstellen, daß damals eine sehr große Menge verbindungsfähiger Elemente mit einer unermeßlichen Fülle von Verknüpfungsmöglichkeiten vorhanden war, womit die Bedingungen gegeben waren für die Entstehung einer ungeheuren Mannigfaltigkeit von Systemen und Prozessen in den verschiedenen Graden der Stationarität (Selbsterhaltungsfähigkeit), Kompliziertheit und fortschreitenden Veränderlichkeit. Zur richtigen Beurteilung dieser Anschauung ist es nötig, das, was die „Materie“ von selbst hervorbringen kann, nicht, wie es gewöhnlich geschieht, vorwiegend nach dem zu bemessen, was sie an anorganismischen Systemen erzeugt hat, sondern vielmehr der unermeßlichen Mannigfaltigkeit der Lebenserscheinungen den Maßstab dafür zu entnehmen. Unter den genannten verschiedenen Systemen waren nun auch die Urformen des Lebendigen, und zwar waren es diejenigen, welche durch stationäre Prozesse, eine gewisse Kompliziertheit und eine vom Einfacheren zum Komplizierteren fortschreitende Veränderlichkeit (Entwickelungsfähigkeit) ausgezeichnet waren. Aus allen übrigen Systemen hingegen ging im wesentlichen die heutige anorganismische, anorganische Materie hervor. Doch auch unter den anorganismischen Systemen gibt es solche mit Prozessen von einer gewissen Stationarität, Kompliziertheit und fortschreitenden Veränderlichkeit, wie z. B. das aus Atmosphäre, Flüssen und Meeren bestehende Wassersystem der Erde, ferner Vulkane, heiße Quellen usw.

Aus der kurz charakterisierten Theorie läßt sich auch ableiten, wie die heutige beträchtliche Kluft zwischen lebendigen und anorganismischen Systemen zustande gekommen ist, indem die weniger stationären Zwischenglieder zwischen den beiden Gruppen sich nicht auf die Dauer erhalten konnten.

Von dem Wesen der Entwickelungsfähigkeit der lebendigen Systeme können wir uns nur eine ganz allgemeine Vorstellung bilden. Nach dem zweiten Hauptsatz der Energetik besteht die Entwickelungsfähigkeit eines Systems darin, daß in dem System nicht-kompensierte Energiedifferenzen vorhanden sind, die sich stets im Sinne einer Zunahme der Entropie ausgleichen, und daß dabei immer wieder neue Energiedifferenzen geschaffen werden. Hierbei können sich sowohl Systeme entwickeln,

deren Kompliziertheit abnimmt, als auch solche, wo sie unverändert bleibt, als auch endlich solche, in denen sie zunimmt; nur die letzteren sind oder werden im allgemeinen „Organismen". An der Verwirklichung der Entwickelung auf Grund der Entwickelungsfähigkeit werden, wie mir scheint, die „äußeren" Faktoren anfangs einen verhältnismäßig größeren Anteil haben als später. Auf die sehr verschiedenen Rollen, welche dabei die relativ konstanten, fluktuierenden und periodisch wirkenden äußeren Faktoren spielen, auf die sehr verschiedenen „Selektionswirkungen", die sie ausüben, u. dgl. sei hier nicht näher eingegangen.

Sich speziellere chemische Vorstellungen von den frühesten lebendigen Systemen zu bilden oder auch anzugeben, von welchem Entwicklungsstadium an man die komplizierten, fortschreitend veränderlichen Systeme mit stationären Prozessen als „lebendig" bezeichnen will, hätte wohl wenig Wert. Nur soviel sei gesagt, daß die lebendigen Systeme erst in jener Zeit den einfachsten heute existierenden ähnlich werden konnten, als tropfbar-flüssiges Wasser von nicht zu hoher Temperatur auf der Erde vorhanden war. Mit diesen prinzipiellen Hinweisen müssen wir uns hier begnügen und von einer Anwendung dieser allgemeinen Entwickelungstheorie auf die einzelnen Erscheinungsg uppen der Ontogenie und Phylogenie absehen.

4b) Vitalistische Erklärungsversuche und ihre Kritik. Vitalistische, also dualistische, Erklärungsversuche von Lebenserscheinungen könnten nur dann eine gewisse Berechtigung beanspruchen, wenn mit größter Wahrscheinlichkeit festgestellt wäre, daß die betreffenden Erscheinungen sich monistisch niemals befriedigend werden erklären lassen, und wenn ferner nachgewiesen wäre, daß die stattdessen dargebotenen vitalistischen Erklärungen wenigstens abgesehen vom Dualismus einwandfrei seien. In Wirklichkeit aber gibt es, wie schon erwähnt, keine Lebenserscheinung, von der man auch nur das geringste Recht hätte zu behaupten, sie sei niemals monistisch zu erklären. Vielmehr werden mit dem Fortschritt der Naturwissenschaften immer mehr früher für unerklärbar gehaltene Erscheinungen in das Bereich der Erklärbarkeit gerückt und es bleiben für einen umsichtigen Beurteiler prinzipiell unerklärbare Erscheinungen überhaupt nicht mehr übrig. Dürfte man bei der jetzigen Lage der Biologie dualistische Erklärungen für notwendig halten, so müßte man solche ebensogut jetzt z. B. auch innerhalb des Gebietes der Physik verlangen, da auch hier manche monistische Erklärungen noch nicht befriedigend durchgeführt werden können. Und außerdem findet man bei näherer Betrachtung, daß die vitalistischen Erklärungen auch neben ihrem Dualismus noch grobe Verstöße gegen die Prinzipien echt naturwissenschaftlicher Erklärung enthalten.

Wir wollen zunächst einen Blick auf die vitalistischen Bestrebungen werfen. Sehen wir vom älteren Vitalismus ab, der noch die Mehrzahl der Lebenserscheinungen nur dualistisch, und zwar nur mit Hilfe einer allein den lebendigen Systemen zukommenden „Lebenskraft" glaubte „erklären" zu können, so finden wir heutzutage vitalistische Erklärungsversuche nur noch einerseits für gewisse Gruppen physischer Lebenserscheinungen, andererseits für die psychischen Prozesse. Man kann demnach von einem „physischen" und einem „psychischen" Vitalismus reden. Unter den verschiedenen Formen des heutigen Vitalismus oder „Neovitalismus" sind auch solche, die gleichzeitig „physisch" und psychisch" sind. Von physischen Lebenserscheinungen, die angeblich nur vitalistisch erklärt werden können, sind es vorwiegend die „zweckmäßigen" Eigenschaften des lebendigen Systems oder besser ausgedrückt, die der Selbsterhaltung des Systems dienenden Eigenschaften; und zwar die Entwickelung des der Selbsterhaltung dienenden Baues und das Zustandekommen der der Selbsterhaltung dienenden Prozesse. Es sei bemerkt, daß mit dieser den meisten Vitalisten noch fremden Formulierung der zu erklärenden Tatsachen dem Vitalismus bereits ein Hauptmotiv entzogen ist. Von vitalistischen Anschauungen seien hier nur erwähnt die von Driesch, Reinke, Pauly und Coßmann (bezüglich einiger weiterer Vitalisten und ihrer Charakterisierung siehe J. Petzoldt in Zeitschr. f. allg. Physiologie Bd. 10 Sammelreferat S. 69 1909).

Was zunächst Coßmann betrifft, so glaubt er im lebendigen System eine nur ihm eigene, nämlich „teleologische" Gesetzmäßigkeit gefunden zu haben, für die er auch eine mathematische Formel gibt. Diese Formel enthält aber einen mathematischen Fehler, und wenn man diesen korrigiert, so erhält man eine ganz allgemeine („kausale") Gesetzmäßigkeit. Die vitalistischen Anschauungen von Driesch, Reinke und Pauly zeigen im wesentlichen übereinstimmende prinzipielle Fehler. Sie füllen die Lücken zwischen den zu erklärenden Tatsachen (vgl. S. 82) durch Komplexe von Bestandteilen und durch Gesetzmäßigkeiten aus, die erstens nicht in die betreffenden Zusammenhänge passen, zweitens nicht den Ansprüchen der einfachsten und drittens nicht denen einer vollständigen Ausfüllung der Lücken entsprechen. Das gilt ebenso für die „Entelechie" von Driesch wie

für die „Dominanten“ und „nichtenergetischen Kräfte“ von Reinke und die „Elementarseelen“ von Pauly. Sie eignen sich nämlich deshalb nicht zur Herstellung des Zusammenhanges zwischen den zu erklärenden Tatsachen, weil sie so komplizierte Komplexe und Prozesse voraussetzen, wie wir sie nur in den hochentwickelten Nervensystemen der intelligentesten Tiere kennen. Denn solche der „Entelechie“ usw. zugesprochene Prozesse oder Leistungen, die unter Umständen sogar mit „Urteilen“, „Bedürfnisgefühlen“ und „Ueberlegung“ verbunden sein sollen, können wir vor allem in einer einfachen Zelle (Eizelle, einzelligem Organismus) und einfachen Zellkomplexen wie Furchungskugeln usw. durchaus nicht annehmen. Wir können nämlich schon heute sagen, daß so komplizierte Prozesse, wie es z. B. die Bildung eines Urteils ist, nur möglich sind durch die große Zahl der verschiedenartigen Nervenelemente des Zentralnervensystems, durch die ungeheure Menge und Mannigfaltigkeit ihrer gegenseitigen Verbindungen, durch ihre hochgradige Reizbarkeit und die große Geschwindigkeit der Reizleitung von Neuron zu Neuron, wodurch das fast gleichzeitige Zusammenarbeiten der verschiedensten Teile des Zentralnervensystems bedingt ist. Hier müssen wir zweifellos einfachere Hypothesen machen als die Vitalisten und die früher (vgl. S. 64 ff.) angeführten Erfahrungen und Ueberlegungen machen es höchst wahrscheinlich, daß dies erreichbar ist. Also wir sehen hier den zweiten schweren Verstoß des Vitalismus gegen die naturwissenschaftlichen Erklärungsprinzipien: er macht nicht die einfachste Hypothese zur Ausfüllung der Lücken zwischen den Tatsachen. Der dritte Verstoß endlich, nämlich der gegen die Forderung einer vollständigen „Beschreibung“ oder Herstellung des Zusammenhanges, besteht darin, daß der Vitalismus unanalysierte Komplexe, wie die „Entelechie“ usw. zu seinen „Erklärungen“ benutzt, und zwar sogar solche Komplexe, die nach seiner eigenen Ansicht vermöge der allgemeinen Prinzipien der Naturwissenschaften überhaupt nicht analysiert werden können. In dieser Ansicht hauptsächlich ist neben der Zweiteilung der Welt in eine „physische“ und „psychische“ das dualistische Prinzip des Vitalismus enthalten. Damit läßt sich aber ebensowenig eine befriedigende naturwissenschaftliche Erklärung geben, wie etwa ein Vorgang im menschlichen Organismus schon dadurch vollständig erklärt wäre, daß man nur ganz allgemein seine Abhängigkeit vom Zentralnervensystem feststellt.

Man kann daher die Kritik der vitalistischen Erklärungsversuche so zusammenfassen: Sie sind einerseits bedingt durch die von der Mehrzahl der Biologen angenommene unhaltbare Zweiteilung der Welt in eine „physische“ und eine „psychische“ und werden bei einer Ersetzung dieser Hypothese durch Anschauungen nach Art des heutigen „Positivismus“ viel an Boden verlieren; andererseits ist der Vitalismus die Folge einer ungenügenden Beherrschung der naturwissenschaftlichen Erklärungsprinzipien, mit deren weiterer Klärung und Verbreitung diese vitalistischen Scheinerklärungen wohl vollends verschwinden werden.

Literatur. *Aus folgenden Werken ist die weitschichtige Literatur des behandelten Gegenstandes zu ersehen:* ***M. Verworn****, Allgemeine Physiologie, 5. Auflage, Jena 1909.* — ***O. Hertwig****, Allgemeine Biologie, 3. Auflage, Jena 1909.* — ***M. Verworn****, Die Biogenhypothese. Eine kritisch-experimentelle Studie über die Vorgänge in der lebendigen Substanz, Jena 1903.* — ***P. Jensen****, Organische Zweckmäßigkeit, Entwickelung und Vererbung vom Standpunkt der Physiologie, Jena 1907.* — ***E. Mach****, Die Analyse der Empfindungen usw., 6. Aufl., Jena 1911.* — ***Derselbe****, Erkenntnis und Irrtum, Leipzig 1905.* — ***J. Petzoldt****, Einführung in die Philosophie der reinen Erfahrung, Leipzig 1900/1904.*

P. Jensen.

Lebensbedingungen.

1. Begriff der Lebensbedingungen. 2. Die allgemeinen inneren Lebensbedingungen: a) Die inneren chemischen Lebensbedingungen. b) Die inneren physikalischen Lebensbedingungen. c) Die inneren morphologischen Lebensbedingungen. 3. Die allgemeinen äußeren Lebensbedingungen: a) Die Stoffzufuhr: α) Die Nahrung. β) Das Wasser. γ) Der Sauerstoff. b) Die Energiezufuhr. c) Der statische Druck. d) Der osmotische Druck. e) Die Temperatur.

1. Begriff der Lebensbedingungen. Das Leben ist ein komplexer Vorgang, dessen wissenschaftliche Erforschung nur nach denselben Prinzipien durchgeführt werden kann, wie die Erforschung aller anderen Vorgänge in der Welt. Diese Prinzipien bestehen darin, daß man die sämtlichen Bedingungen des Vorganges zu ermitteln sucht, d. h. die sämtlichen Faktoren, von denen der Vorgang abhängig ist. Man pflegt freilich noch heute, vielfach selbst in der Naturforschung, alter Tradition folgend den Bedingungen eines Vorganges seine „Ursache“ gegenüberzustellen, indem man diesem Faktor eine ganz besondere ausschlaggebende Bedeutung für das Zustandekommen des Vorganges beilegt. Indessen, ein solcher Gegensatz

zwischen der Ursache und den Bedingungen eines Vorganges ist zwar auf Grund der prähistorischen und historischen Entwickelung des menschlichen Denkens gerechtfertigt, läßt sich aber nach dem heutigen Stande unserer Erkenntnis wissenschaftlich nicht mehr aufrecht erhalten. Was wir im täglichen Leben „die Ursache" eines Vorganges zu nennen pflegen, ist in Wirklichkeit ebenfalls nur eine Bedingung, die uns nur, weil sie etwa als zuletzt hinzutretende Bedingung oder aus sonst einem Grunde mehr in die Augen fällt, eine besondere Bedeutung für das Zustandekommen des Vorganges zu haben scheint. In Wirklichkeit hat sie für den Vorgang keine größere Bedeutung als alle übrigen Bedingungen, d. h. sie ist wie jede Bedingung notwendig zum Zustandekommen desselben. Eine Bedingung ist immer notwendig und kann nicht mehr und nicht weniger wichtig für den Vorgang sein, als daß sie eben notwendig ist. Alle wissenschaftliche Forschung besteht daher immer nur darin, die sämtlichen Bedingungen eines Vorganges oder Zustandes zu ermitteln, nicht seine Ursache. Ein Vorgang oder Zustand ist nicht wissenschaftlich erforscht, wenn wir seine „Ursache", d. h. irgendeine augenfällige Bedingung ermittelt haben, sondern erst wenn wir seine sämtlichen Bedingungen kennen. In diesem Falle ist er aber auch vollständig erkannt. Eine weitere Analyse darüber hinaus gibt es in der wissenschaftlichen Forschung nicht, denn der Vorgang oder Zustand ist eindeutig bestimmt und identisch mit der Summe seiner einzelnen Bedingungen. Was wir Bedingungen nennen, sind ja auch Dinge, d. h. Vorgänge oder Zustände, die selbst wieder bedingt sind durch andere Dinge. So findet die wissenschaftliche Analyse nirgends und nie „absolute Dinge", sondern überall nur Abhängigkeitsverhältnisse in unendlichem Zusammenhange. Indem die wissenschaftliche Forschung diese analysiert, erforscht sie die einheitliche Gesetzmäßigkeit des Seins und Geschehens.

So ist auch das Leben wie jeder Vorgang in der Welt eindeutig bestimmt durch seine sämtlichen Bedingungen, und wenn die Physiologie die Aufgabe verfolgt, das Leben wissenschaftlich zu erforschen, so besteht diese Aufgabe im einzelnen darin, die sämtlichen Lebensbedingungen zu ermitteln.

Es ist selbstverständlich, daß bei einem so ungeheuer komplexen Vorgange, wie das Leben ist, die Summe der Bedingungen, von denen er abhängig ist, unabsehbar groß sein muß. Um eine Uebersicht zu gewinnen, ist es daher nötig, Gruppen zu unterscheiden. Da hat sich seit langer Zeit die sehr naheliegende Einteilung der Lebensbedingungen in innere und äußere ergeben. Die inneren Lebensbedingungen liegen im Organismus selbst, die äußeren Lebensbedingungen in dem umgebenden Medium. In beiden Gruppen aber pflegt man ferner zu trennen die allgemeinen Lebensbedingungen, von denen alle Organismen abhängig sind, und die speziellen Lebensbedingungen, die für jede spezielle Organismenform erfüllt sein müssen, wenn ihr Leben dauernd bestehen soll. Die speziellen Lebensbedingungen sind daher für jede Organismenform wieder verschieden und stellen eine unübersehbare Mannigfaltigkeit vor, die sich einer zusammenfassenden Behandlung entzieht. Hier können nur die allgemeinen inneren und äußeren Lebensbedingungen übersichtlich zusammengestellt und nur einzelne spezielle Lebensbedingungen von weiterer Verbreitung oder besonderem Interesse berücksichtigt werden.

2. Die allgemeinen inneren Lebensbedingungen. Die allgemeinen inneren Lebensbedingungen eines Organismus umfassen sämtliche Verhältnisse, die in jeder lebendigen Substanz realisiert sind. Nur wo schon lebendige Substanz gegeben ist, kann auch ferner Leben weiter bestehen. Eine künstliche Zusammensetzung der inneren Lebensbedingungen zu lebendiger Substanz ist bisher nicht möglich gewesen und wird in absehbarer Zeit nicht möglich sein, weil wir noch weit davon entfernt sind, sämtliche innere Lebensbedingungen für irgendeinen Organismus zu kennen. Die allgemeinen inneren Lebensbedingungen, die wir kennen, sind z. T. chemischer, z. T. physikalischer und z. T. morphologischer Art.

2a) Die inneren chemischen Lebensbedingungen liegen in der Existenz bestimmter chemischer Verbindungen im lebendigen System. Diese Verbindungen sind teils solche, die nur im Organismus vorkommen, teils solche, die auch in der anorganischen Natur zu finden sind. Unter den organischen Verbindungen, die als unentbehrliche Grundlage alles Lebens zu betrachten sind, spielen die Eiweißkörper die wichtigste Rolle (vgl. den Artikel „Eiweißkörper"). Eiweißkörper und Eiweißverbindungen sind in mannigfaltiger Art in jedem lebendigen System vorhanden. Sie stellen die kompliziertesten chemischen Stoffe vor, sind die einzigen stickstoffhaltigen organischen Verbindungen, die in der lebendigen Substanz vorkommen, und bilden, wenn wir absehen von aufgespeicherten Reservematerialien, die Hauptmasse aller organischen Verbindungen des Organismus. Neben den Eiweißkörpern spielen eine wichtige Rolle in jeder lebendigen Substanz die Kohlehydrate (vgl. den Artikel „Kohlehydrate") und Fette (vgl. den Artikel „Fette"), die sich chemisch durch ihren Mangel an

Stickstoff und durch ihre Konstitution von den Eiweißkörpern unterscheiden. Unter den anorganischen Verbindungen der lebendigen Substanz stellen vor allem das Wasser und gewisse Salze allgemeine Lebensbedingungen vor. Das Wasser bildet die Hauptmasse aller lebendigen Substanz, denn es macht durchschnittlich 60 bis 80 % ihres gesamten Gewichts aus. In einzelnen Fällen, wie z. B. bei den glashellen pelagisch lebenden Seetieren geht sogar der Wassergehalt des Körpers über 90 % hinaus. Unter den Salzen sind die Chloride, Phosphate, Carbonate und Sulfate der Alkalien (Na, K) und alkalischen Erden (Mg, Ca) allgemein in aller lebendigen Substanz verbreitet.

2b) Die inneren physikalischen Lebensbedingungen hängen auf das engste mit den Eigenschaften der chemischen Stoffe der lebendigen Substanz zusammen. So beruht die flüssige Konsistenz der lebendigen Substanz auf dem großen Wassergehalt. Das Wasser stellt mit den verschiedenen chemischen Stoffen, soweit sie nicht wie z. B. die Fette und fettähnlichen Körper (Lipoide) in Wasser unlöslich sind, teils echte, teils kolloidale Lösungen her. Ohne die flüssige Konsistenz der lebendigen Substanz kann kein aktives Leben bestehen. Ausgetrocknete lebendige Substanz kann wohl in einzelnen Fällen lebensfähig sein, ist aber niemals lebendig. Eine wichtige physikalische Eigenschaft gewinnt die lebendige Substanz ferner durch die kolloidalen Lösungen der Eiweißkörper und Eiweißverbindungen und die Lipoide. Diese geben den Oberflächen der lebendigen Körper die Eigenschaften von semipermeablen Membranen, d. h. von Membranen, die auf die Diffusion löslicher Stoffe eine elektive Wirkung ausüben. Lebendige Oberflächen lassen daher von den diffusiblen Stoffen einzelne leichter, andere schwerer, wieder andere gar nicht hindurch. Das elektive Vermögen ist dabei abhängig von der chemischen Zusammensetzung der kolloidalen Oberfläche. Stoffe, welche von dem einen lebendigen System hindurchgelassen werden, können vom anderen zurückgehalten werden. Wasser kann durch alle semipermeablen Oberflächen hindurchtreten. Auf diesem Wege stellt sich eine dritte physikalische Lebensbedingung her, das ist der osmotische Druck im Innern der lebendigen Substanz. Diese Lebensbedingung hängt aufs engste zusammen mit der Anwesenheit der Salze in der lebendigen Substanz und ihres schweren Durchtritts durch die semipermeablen Oberflächen derselben. Der osmotische Druck ist eine Funktion der Zahl der Moleküle des im Wasser gelösten Stoffes. Die Salze sind also hauptsächlich jene Stoffe, die den osmotischen Druck in der lebendigen Substanz erzeugen und unterhalten.

2c) Die inneren morphologischen Lebensbedingungen bestehen in dem Zusammenhang und der Anordnung der Teile. Wir kennen die lebendige Substanz nur in der Form von Zellen oder Zelläquivalenten, die aus der Umwandlung von Zellen hervorgegangen sind, wie z. B. die roten Blutkörperchen der Säugetiere. Die Zelle ist der allgemeine morphologische Bestandteil aller heutigen Organismen. Die allgemeinen morphologischen Lebensbedingungen sind daher die allgemeinen Bestandteile der Zelle. Als solche können wir nur das Protoplasma und die Kernsubstanz ansprechen. Andere Bestandteile der Zelle wie die Zellmembran, die Zentrosomen usw. sind nicht in allen Zellen vorhanden. Protoplasma und Kernsubstanz allein gehören untrennbar zum Wesen der Zelle. Teilen wir eine Zelle, z. B. einen freilebenden einzelligen Organismus so, daß beide Teilstücke sowohl Protoplasma als auch Kernsubstanz mitbekommen, so können die Teilstücke am Leben bleiben und sich zu einer kleineren Zelle gleicher Form umgestalten, die dauernd lebensfähig ist. Teilen wir eine Zelle so, daß der eine Teil nur Protoplasma, der andere Protoplasma und Kernsubstanz erhält, so geht der erste zugrunde und nur der letzte bleibt am Leben. Teilen wir die Zelle schließlich so, daß der Zellkern vom Protoplasma isoliert wird, so geht sowohl der Zellkern wie das Protoplasma zugrunde. Die Vereinigung von Protoplasma und Kernsubstanz bildet eine allgemeine innere Lebensbedingung. Von anderen morphologischen Verhältnissen bleibt es zweifelhaft, ob sie allgemeine Bedingungen vorstellen. So ist z. B. die Frage, ob eine allgemeine Struktur des Protoplsamas und des Kerns besteht, die bei allen Zellen die gleiche wäre, vorläufig noch nicht mit voller Sicherheit zu bejahen. Die von Bütschli entdeckte Waben- oder Schaumstruktur, die Bütschli selbst für eine allgemeine Struktur alles Protoplasmas ansieht, ist zwar ganz außerordentlich weit verbreitet, läßt sich aber doch bei einzelnen Zellen, wie z. B. manchen Amöben und Rhizopoden, nicht mit Sicherheit feststellen. In einigen Fällen scheint die Wabenstruktur erst bei der Reizung durch Entmischung des Protoplasmas in Substanzen von verschiedener Konsistenz zu entstehen, wie z. B. bei Gromia Dujardini und anderen Rhizopoden. Auch von den durch R. Hertwig und seine Schüler entdeckten und untersuchten „Chromidien", die als feine Netze oder Fäden oder Klümpchen von besonderem Färbungsvermögen im Protoplasma vieler Zellen beobachtet worden sind, läßt sich vorläufig noch nicht sagen,

ob sie zu den allgemeinen Bestandteilen der Zelle gehören.

3. Die allgemeinen äußeren Lebensbedingungen. Sie umfassen alle einzelnen Bedingungen, die im äußeren Medium realisiert sein müssen, wenn Leben existieren soll. Es sind die Bedingungen der Stoffzufuhr, der Energiezufuhr, eines bestimmten statischen Druckes, eines bestimmten osmotischen Druckes und einer bestimmten Temperatur.

3a) Die Stoffzufuhr. Da alle Organismen, solange sie leben, einem Stoffwechsel unterliegen, in welchem eben das Leben besteht, so ist es selbstverständlich für das dauernde Fortbestehen des Lebens eines Organismus notwendig, daß der Verlust an Stoffen, den er durch die Abgabe seiner Stoffwechselprodukte erleidet, durch Aufnahme von Stoffen aus dem umgebenden Medium wieder gedeckt wird. Man pflegt die Gesamtheit dieser Stoffe meistens in verschiedene Gruppen einzuteilen, indem man die Nahrung im engeren Sinne vom Wasser und dem Sauerstoff unterscheidet. Eine solche Trennung ist in strenger Weise zwar nicht durchzuführen, denn bei der Pflanze besteht die eigentliche Nahrung zum großen Teil aus Wasser und aus Kohlensäure, indessen kann aus praktischen Gründen die übliche Unterscheidung der eigentlichen Nahrung vom Wasser und dem Sauerstoff vorläufig beibehalten werden.

α) Die Nahrung ist nur insofern eine allgemeine äußere Lebensbedingung, als jeder Organismus, solange er sich im Zustande aktiven Lebens befindet, bestimmte Stoffe als Nahrung aufnehmen muß. Die Art der Nahrung dagegen ist bei jeder Organismengruppe wieder eine andere und nur größere Organismengruppen zeigen gewisse allgemeine Uebereinstimmungen in diesem Punkte. So leben die sämtlichen grünen Pflanzen mit einer Nahrung, die aus anorganischen Stoffen wie Wasser, Kohlensäure und einfachen Salzen besteht. Die Tiere dagegen sind auf organische Nahrungsstoffe angewiesen und kein Tier kann ohne Eiweißkörper oder deren nächste Abkömmlinge auf die Dauer existieren. Zwischen Tieren und grünen Pflanzen bilden die Pilze ein Mittelglied, insofern sie ihren Kohlenstoffbedarf wie die Tiere nur aus organischen Verbindungen decken können, während sie ihren Stickstoffbedarf wie die grünen Pflanzen aus anorganischen Stoffen bestreiten ohne wie die Tiere auf die stickstoffhaltigen Eiweißkörper angewiesen zu sein.

Bezüglich der Nahrungsmenge besteht insofern eine allgemeine Uebereinstimmung bei allen Organismen, als zur dauernden Erhaltung des Lebens in der Nahrung dieselbe Menge der einzelnen Elementarstoffe enthalten sein muß, die mit den Stoffwechselprodukten in anderer chemischer Bindung den Körper wieder verläßt. Ist das der Fall, so befindet sich der Organismus im „Stoffwechselgleichgewicht", d. h. seine Einnahmen und Ausgaben an Stoffen halten sich die Wage. Wichtig ist nun die Frage nach den Folgen einer Veränderung dieser notwendigen Nahrungsmenge. Die Nahrungsmenge kann einerseits gesteigert, andererseits herabgesetzt werden. Bei Steigerung der eben zur Erhaltung des Stoffwechselgleichgewichts nötigen Nahrungsmenge tritt im allgemeinen eine Vermehrung der lebendigen Substanz, bei einzelligen Organismen ein Wachstum, eine Zellteilung und dadurch eine Fortpflanzung ein. Bei den höheren Organismen, den höheren Pflanzen und den höheren Tieren ist aber der Vermehrung der lebendigen Substanz eine Grenze gezogen, deren Bedingungen jedenfalls sehr komplexer Natur und noch nicht genauer analysiert worden sind. Innerhalb gewisser Grenzen ist zwar auch hier eine Mästung möglich durch überreichliche Nahrungszufuhr, aber diese Mästung besteht zum größten Teil in einer Aufspeicherung von Reservematerialien, wie Fett, Kohlehydraten, Eiweiß, nur zum geringeren Teil in Vermehrung der lebendigen Substanz. Bei Verminderung oder vollständiger Entziehung der Nahrung tritt der Zustand des Hungers ein. Die lebendige Substanz hat größere Ausgaben als Einnahmen an Stoffen, infolgedessen nimmt sie an Masse ab. Dabei ist es interessant, daß bei der einzelnen Zelle ebensowenig wie bei den vielzelligen höheren Organismen die Abnahme alle Teile gleichmäßig betrifft. Es zeigt sich vielmehr ein für die möglichst lange Sicherung der Existenz des Organismus sehr vorteilhaftes Verhältnis, indem die entbehrlichsten Teile des Organismus am meisten, die lebenswichtigsten am wenigsten durch den Substanz- und Gewichtsverlust im Hunger betroffen sind. So hat Chossat für verhungernde Tauben festgestellt, daß beim Eintritt des Hungertodes das Fettgewebe etwa 93 %, die Milz, das Pankreas, die Leber 62 bis 71 %, die Muskeln 34 bis 43 %, die Lungen, die Nieren, die Haut 22 bis 33 % und die Bestandteile des Nervensystems nur etwa 2 % ihres Gewichts verloren haben. An einzelligen Infusorien findet, wie Wallengren und Kasanzeff gefunden haben, ebenfalls im Hunger zunächst ein Verbrauch der in Granulaform aufgespeicherten Reservematerialien, dann ein Einschmelzen des Entoplasmas, dann eine Verminderung des Exoplasmas und seiner Differenzierungen (Wimpern, Trichocysten), zuletzt ein Zerfall des massigen Makronucleus statt. Der Mikronucleus dagegen bleibt bis ans Ende, wo die ganze Zelle körnig zerfällt,

nahezu unverändert. Solange noch ein gewisser Rest Protoplasma mit etwas Makronucleussubstanz übrig geblieben ist, gelingt es, durch neue Nahrungszufuhr die Zelle zu retten. Ist erst der Makronucleus vollständig zerfallen, dann ist auch die Lebensfähigkeit erloschen und die Zelle geht unrettbar allmählich zugrunde. So findet beim Hunger, wie Luciani sich ausdrückt, ein Kampf ums Dasein unter den Teilen des Organismus statt, in dem sich die lebenswichtigeren überlegen zeigen und die Lebensmöglichkeit retten, solange sie selbst noch leben.

β) Das Wasser bildet eine allgemeine äußere Lebensbedingung, denn die lebendige Substanz selbst, die durchschnittlich 75 % Wasser enthält, gibt mit den Stoffwechselprodukten dauernd Wasser nach außen hin ab. Dieser Verlust muß durch Wasseraufnahme wieder gedeckt werden. Infolgedessen sehen wir auch, daß bei Wasserentziehung das Leben früher oder später aufhört. Dabei kommt es nicht allgemein gleich zum Tode. Es gibt zahllose Organismen der verschiedensten Art, die durch bestimmte Einrichtungen, welche ihnen gestatten, mit geringen Mengen Wasser hauszuhalten, befähigt sind, lange Zeit in der Trockenheit zu existieren (Wüstenorganismen). Einzelne pflanzliche wie tierische Organismen können sogar vollständiges Eintrocknen ertragen, ohne ihre Lebensfähigkeit einzubüßen. Dabei hört allerdings das aktive Leben auf und sie verfallen in einen Zustand des latenten Lebens, in dem der Stoffwechsel vollkommen stillsteht. Trockene Pflanzensamen, Bakteriensporen, aber auch Bärentierchen und Rädertierchen können bei äußerer Wasserentziehung in diesen Zustand, der weder Tod noch Leben ist, übergehen. Allerdings kann dieser Zustand nicht unbegrenzt lange bestehen bleiben, aber jedenfalls nur, weil äußere Schädigungen im Laufe von Jahrhunderten nicht ganz zu vermeiden sind. Pflanzensamen sind nachweislich in Sammlungen zwar 150 bis 200 Jahre keimfähig geblieben, die Angabe aber, daß der den Toten in ägyptischen Gräbern beigegebene „Mumienweizen“ noch keimfähig war, hat sich bei genauerer Untersuchung dieses Verhältnisses als Täuschung herausgestellt. Werden Organismen, die sich im Zustande des latenten Lebens befinden, wieder angefeuchtet, so kehrt das aktive Leben zurück, ein Vorgang, der als „Anabiose“ bezeichnet worden ist. Wird ein eingetrocknetes Bärentierchen (Macrobiotus), das von einem mikroskopischen Sandkörnchen kaum zu unterscheiden ist, in Wasser gebracht, so quillt es zunächst auf, nimmt seine normale Gestalt wieder an, und nach kurzer Zeit fängt es an, sich zu bewegen. Es beginnt sein Leben von neuem an dem Punkte, an dem es zum Stillstand gekommen war. Der Wassergehalt jeder spezifischen Form der lebendigen Substanz ist ein ganz bestimmter. Wird er künstlich durch Wasserentziehung oder durch Wasseranreicherung auf osmotischem Wege verändert, so verändern sich entsprechend auch die Lebensäußerungen des Systems. Bei Verminderung des Wassergehalts z. B. eines Muskels oder Nerven wird im allgemeinen zunächst die Erregbarkeit stark gesteigert. Später weicht diese Erregbarkeitssteigerung einer Lähmung. Bei Erhöhung des Wassergehalts wird die Erregbarkeit stark herabgesetzt. Der spezifische Erregbarkeitsgrad jeder Form der lebendigen Substanz ist in engster Weise bedingt durch ihren Wassergehalt.

γ) Der Sauerstoff ist keine allgemeine Lebensbedingung. Dennoch kann er hier mit angeführt werden, weil nur eine verschwindend geringe Zahl von Organismen sich von ihm emanzipiert hat. Diese Organismen, welche die Fähigkeit haben, ohne Sauerstoff zu existieren, werden als „anaerobe Organismen“ allen anderen gegenübergestellt, die als „aerobe Organismen“ ohne Sauerstoff nicht existieren können. Zur ersten kleinen Gruppe gehören nur niedere Organismen, wie Bakterien, wirbellose Tiere usw. Alle höheren Tiere sind aerob. Unter den anaeroben Organismen sind aber auch noch zwei Gruppen zu unterscheiden, solche, die bei Sauerstoffzutritt zugrunde gehen, die man daher als obligat anaerobe und solche, die auch bei Sauerstoffanwesenheit existieren können und dann den Sauerstoff verbrauchen, die man daher als fakultativ anaerobe Organismen bezeichnet. Unter den aeroben Organismen existieren sehr verschiedene Grade der Abhängigkeit von der Sauerstoffmenge. Sämtliche aeroben Organismen kommen schon mit einer geringeren Menge von Sauerstoff aus, als sich in der atmosphärischen Luft findet (21 %). Säugetiere z. B. können noch mit 14 % Sauerstoff in der Luft dauernd existieren, während sie bei 7 % Sauerstoff schon deutliche Störungen zeigen. Interessant ist die Tatsache, daß eine zu große Sauerstoffmenge direkt schädigend wirkt. Das Infusorium Spirostomum, das im Schlamm sumpfiger Gewässer lebt, ist durchaus aerob, denn es braucht mindestens 7 bis 8 % Sauerstoff, geht aber bei 21 % Sauerstoff bereits nach 1 bis 2 Stunden, wie Pütter gezeigt hat, zugrunde. Säugetiere können in reinem Sauerstoff existieren, gehen aber, wenn der Druck auf 3 Atmosphären erhöht wird, in reinem Sauerstoff zugrunde, während sie in atmosphärischer Luft noch bei einem Druck von 15 Atmosphären existieren können. Die schädigende Wirkung zu großer Sauer-

stoffmengen, die von Pflüger irrtümlich als eine Erstickung gedeutet wurde, beruht in Wirklichkeit, wie Pütter nachweisen konnte, auf einer Vergiftung. Sauerstoff in zu starker Konzentration wirkt giftig. Auf der anderen Seite gehen alle aeroben Organismen ebenfalls zugrunde, wenn man ihnen ungenügende Mengen von Sauerstoff bietet oder wenn man ihnen den Sauerstoff ganz entzieht. Der Vorgang, der sich dabei entwickelt, ist die Erstickung. Die Erstickung erfolgt ganz allgemein unter Lähmungserscheinungen. Die Erregbarkeit des lebendigen Objekts nimmt mehr und mehr ab, die normalen Lebensäußerungen hören auf und schließlich erfolgt der Tod. Bei den Säugetieren geht dieser Lähmung aber ein kurzdauerndes Erregungsstadium voraus, das in dem Auftreten forcierter Atmung und schließlich von Erstickungskrämpfen, den sogenannten „Tenner-Kußmaulschen Krämpfen", zum Ausdruck kommt. Diese Erregungssymptome haben ihren Ursprung in den Zentren des verlängerten Markes, des untersten Gehirnabschnitts und sind nicht etwa Schmerzensäußerungen des erstickenden Tieres. Wie Mosso am Menschen nachweisen konnte, erlischt vielmehr das Bewußtsein nach Unterbrechung der Sauerstoffzufuhr zum Gehirn schon in wenigen Sekunden, lange bevor Erstickungskrämpfe auftreten. Die Großhirnrinde, deren intakte Erregbarkeit die Bedingung für das Zustandekommen von bewußten Empfindungen bildet, wird bei Sauerstoffmangel viel früher gelähmt als die Zentra des verlängerten Markes, deren Erstickung die Tenner-Kußmaulschen Krämpfe bedingt.

3b) Die Energiezufuhr. Wie die lebendige Substanz dauernd einen Stoffwechsel hat, so findet auch dauernd, solange sie lebt, ein Energieumsatz in ihr statt, indem sie bestimmte Leistungen vollzieht und dadurch Energie nach außen hin abgibt und dementsprechend wieder Energie aufnimmt, die ihr als Quelle für ihre Leistungen dient. Es muß daher zur Unterhaltung seines spezifischen Energiegetriebes jedem Organismus Energie von außen zugeführt werden. Diese Zufuhr von Energie deckt sich bei den Tieren fast vollständig mit der Stoffzufuhr, insofern als die wesentlichste Quelle aller Energie für den tierischen Organismus in der chemischen Energie der Nahrung und des Sauerstoffs besteht. Die Nahrungsstoffe und der Sauerstoff repräsentieren große Mengen von potentieller chemischer Energie, die im Körper der Tiere in aktuelle Energie umgesetzt als Quelle für seine Leistungen dienen. Vor allem ist es die Oxydation der kohlenstoffhaltigen Nahrung, die im tierischen Organismus die Produktion von Wärme, Bewegung, Elektrizität, Licht und osmotischer Energie bestreitet. Neben der chemischen Energie der Nahrung kommt nur für den Kaltblüterkörper noch die Zufuhr von Wärme in geringem Umfang als Energiequelle in Betracht, nämlich nur für die Fälle, wo eine Temperaturerhöhung des Mediums (Erwärmung der Luft oder des Wassers durch Sonne usw.) eine Zufuhr von Wärme in den kälteren Organismenkörper mit sich bringt und hier eine Erwärmung und damit eine Reaktionsbeschleunigung der chemischen Umsetzungen zur Folge hat. Bei den grünen Pflanzen deckt sich indessen Stoffzufuhr und Energiezufuhr durchaus nicht. Die Stoffe, welche der Pflanze als Nahrung dienen, wie Wasser, Salze, Kohlensäure, repräsentieren keine oder nur sehr geringe chemische Energiewerte. Aus ihnen muß im Pflanzenkörper erst durch Umsetzungen, die eine Energiezufuhr erfordern, chemische Energie verfügbar gemachen werden. Nur in geringem Maße kommt für den Pflanzenkörper die Zufuhr von chemischer Energie mit dem Sauerstoff in Betracht. Die Energie, die bei weitem die wichtigste Quelle für alle energetischen Leistungen des Pflanzenkörpers vorstellt, ist das Licht. Vor allem sind es die roten Strahlen des Sonnenlichts, wie Engelmann gezeigt hat, welche in den grünen Pflanzenzellen in chemische Energie umgewandelt werden und die Leistungen der Pflanzenzelle bestreiten. Entzieht man einer grünen Pflanze die Lichtzufuhr, so geht sie früher oder später zugrunde. Schließlich kommt für die Pflanzen auch die Wärme in dem gleichen Sinne wie für die Kaltblüter hinzu.

3c) Der statische Druck. Da das Leben auf dem Ablauf von chemischen Umsetzungen beruht, und da chemische Prozesse in hohem Grade vom Druck abhängig sind, so ist es verständlich, daß das Vorhandensein eines bestimmten statischen Druckes zu den allgemeinen äußeren Lebensbedingungen gehören muß. Indessen scheinen die Grenzen des Druckes, innerhalb deren Leben überhaupt bestehen kann, recht weit zu sein. Ueber die Wirkungen starker Druckerhöhung haben besonders die Experimente Regnards Aufschlüsse gegeben. Regnard benutzte einen Apparat, der es ihm möglich machte, eine Druckerhöhung des Mediums bis auf 1000 Atmosphären zu erzielen. Mit diesem Apparate untersuchte er die verschiedensten Organismen und fand, daß bei einer Drucksteigerung über einige hundert Atmosphären schon bei den meisten Formen der lebendigen Substanz die Lebensäußerungen gelähmt werden. Froschmuskeln verlieren ihre Erregbarkeit schon bei 400 Atmosphären und werden bei 600 Atmosphären starr und steif. Hefezellen verlieren

bei 400 Atmosphären ihre Fähigkeit, Traubenzuckerlösungen zu vergären. Fäulnisbakterien vermögen bei 700 Atmosphären an Fleisch, Eiern, Blut usw. keine Fäulnis mehr zu erzeugen. Bei längerem Aufenthalt aller dieser Organismen unter so hohen Druckwerten erlischt das Leben ganz. Die Wirkungen einer Erniedrigung des statischen Druckes, unter dem die Organismen leben, sind in reiner Form zum Teil überhaupt nicht zu studieren. Hebt man für aerobe Organismen den Atmosphärendruck auf, so ersticken sie, weil sie keinen Sauerstoff mehr zur Verfügung haben. Darauf beruht die Gefahr für den Menschen bei Höhenfahrten im Luftballon. Bei 7000 bis 8000 m Höhe tritt bereits eine Bewußtseinslähmung durch relativen Sauerstoffmangel ein, wenn nicht künstliche Sauerstoffatmung gemacht wird. Die Aufhebung des Wasserdrucks bei Wassertieren scheint ohne wesentlichen Einfluß zu sein. Nur bei Tieren, die in sehr großer Tiefe leben, wie bei Tiefseefischen, tritt der Tod ein, wenn sie an die Oberfläche gebracht werden, aber nicht infolge der Aufhebung des Drucks der auf der lebendigen Substanz der Zellen lastet, sondern weil die Schwimmblasengase sich so enorm ausdehnen, daß sie den ganzen Körper zersprengen.

3d) Der osmotische Druck. Da die lebendige Zelle eine wässerige Lösung vorstellt, in der osmotisch wirksame Stoffe enthalten sind, und da ihre Oberfläche die Eigenschaften einer semipermeablen Membran besitzt, so muß der osmotische Druck in ihrem Innern im höchsten Maße abhängig sein von dem osmotischen Druck, der im umgebenden Medium herrscht. Er muß mit diesem steigen und sinken. Da ferner die Erhaltung eines bestimmten osmotischen Druckes im Innern der Zelle zu den wichtigsten inneren Lebensbedingungen gehört, so liegt es auf der Hand, daß der osmotische Druck im umgebenden Medium eine ebenso wichtige äußere Lebensbedingung vorstellt. Jede Zelle ist von dem osmotischen Druck des umgebenden Mediums in der Erhaltung ihres Lebens abhängig. Das scheint auf den ersten Blick für die an der Luft lebenden Tiere nicht zu gelten. Allein auch bei diesen ist jede lebendige Körperzelle umspült von einem flüssigen Medium, den Körpersäften (Lymphe und Blut), die selbst ihren osmotischen Druck durch feine regulatorische Mechanismen dauernd auf gleicher Höhe erhalten, so daß bei ihnen in Wirklichkeit jede Zelle dauernd unter gleichem äußerem osmotischem Druck steht. Will man daher Körpergewebe außerhalb des Körpers isoliert einige Zeit am Leben erhalten, so darf man sie nicht in Wasser tun, sondern entweder in Blutplasma oder Blutserum der Tierart, von der sie stammen, oder in eine Salzlösung, welche die Salze des Blutes oder der Lymphe in einer Zusammensetzung enthält, die denselben osmotischen Druck hat wie die Lymphe oder das Blut des betreffenden Tieres. Solche isotonische Salzlösungen bezeichnet man als „physiologische Salzlösungen“. Dabei ist zu berücksichtigen, daß das ein relativer Begriff ist und daß es nicht eine einheitliche physiologische Salzlösung für alle Tiere gibt, sondern, daß die physiologische Salzlösung für jede Tierart ihren bestimmten osmotischen Druck haben muß. So ist z. B. die physiologische Kochsalzlösung für Froschgewebe eine Lösung von 0,7 bis 0,8 %, die physiologische Kochsalzlösung für Säugetiergewebe eine Lösung von 1 % Kochsalz. Veränderungen im osmotischen Druck des umgebenden Mediums, mit dem die Zelle in osmotischem Austausch steht, schädigen die Zelle, und töten sie, wenn sie einen größeren Umfang annehmen. Trotzdem sind manche Zellen selbst gegen weitgehende Veränderungen des osmotischen Druckes im Medium ziemlich resistent. Die Schimmelpilzgattung Mucor kann in ziemlich konzentrierten Salzlösungen existieren, ohne ihre Lebensfähigkeit einzubüßen. Infusorien und Bakterien können wenigstens für kürzere oder längere Zeit in destilliertem Wasser am Leben bleiben.

3e) Die Temperatur. Wie vom statischen Druck, so sind auch alle chemischen Prozesse von der Temperatur abhängig, indem ihre Reaktionsgeschwindigkeit im allgemeinen nach der van't Hoffschen Temperaturregel mit einer Temperaturzunahme um je 10° auf das 2 bis 3 fache steigt. Es ist daher selbstverständlich, daß für den normalen Ablauf der Lebensvorgänge eine bestimmte Temperatur des umgebenden Mediums erforderlich ist. Wird diese Temperatur nach unten oder nach oben überschritten, so machen sich Veränderungen im Ablauf der Lebensvorgänge geltend. Die Lebensprozesse werden mit zunehmender Temperatur zunächst beschleunigt, nach Ueberschreitung eines bestimmten Grades aber gelähmt (Wärmelähmung), indem einzelne Partialvorgänge des Stoffwechsels, bei aeroben Organismen speziell die Oxydationsprozesse, wegen Mangels an Material nicht mehr gleichen Schritt mit den anderen halten können, so daß das zum intakten Leben notwendige harmonische Zusammenwirken aller einzelnen Prozesse aufhört. Mit dem Sinken der äußeren Temperatur werden die Lebensprozesse verlangsamt und gelangen früher oder später zum vollständigen Stillstand (Kältelähmung). Der Ablauf des aktiven Lebens ist also zwischen eine obere und eine untere Temperaturgrenze eingeschlossen, die zwar für jede

Organismenform in verschiedener Höhe liegen können, bei deren Ueberschreitung aber das aktive Leben aufhört. Damit ist nicht gesagt, daß die Lebens f ä h i g k e i t notwendig auch mit Ueberschreitung dieser Grenzen erlöschen müßte. So wie es Organismen gibt, die auch nach Entziehung von Wasser noch nicht ihre Lebensfähigkeit verlieren, obwohl ihr Leben selbst zum Stillstand gelangt, so gibt es auch Organismen, für die wir die Temperaturgrenzen der Lebens f ä h i g k e i t bisher noch nicht feststellen konnten. Seit längerer Zeit schon sind wiederholt Angaben gemacht worden, daß manche wirbellose Tiere, niedere Pflanzen und einzellige Organismen in heißen Quellen bei einer Temperatur von mehr als 60°, 80°, ja 90° aktiv leben. Auf Ischia und in den Geisirn des Yellowstoneparks sind solche Verhältnisse beobachtet worden. Bemerkenswert aber ist die Tatsache, daß die Sporen mancher Bakterienformen im Zustande des latenten Lebens eine Temperaturerhöhung auf mehr als 100° ertragen können, ohne ihre Lebensfähigkeit einzubüßen. Auf der anderen Seite gibt es Organismen, die bei sehr niedrigen Temperaturen ihre Lebensfähigkeit nicht verlieren. Im allgemeinen verträgt die lebendige Substanz das Einfrieren nicht. Werden einzellige Organismen (Amöben, Infusorien), Pflanzenzellen oder tierische Gewebe unter 0° abgekühlt, so daß die Eisnadeln durch ihre lebendige Substanz hindurchschießen, so haben sie beim Auftauen ihre Lebensfähigkeit verloren. Wie M o l i s c h gezeigt hat, findet dabei eine tiefgehende Veränderung der Eigenschaften der kolloidalen Zellbestandteile statt, die mit einer sichtbaren Strukturveränderung verbunden ist. Genau so werden z. B. auch Gelatinelösungen durch Einfrieren verändert. Indessen manche Organismen und selbst Wirbeltiere wie Amphibien und Fische vertragen auch Temperaturen, die weit unter dem Gefrierpunkt liegen. So hat der Physiker R a o u l P i c t e t gefunden, daß Fische, die in einem Eisblock auf —15° abgekühlt wurden, beim Auftauen wieder weiter lebten. Frösche ertrugen eine Temperatur von —28°, Arthropoden von —50°, Mollusken von —120°. Ja, M a c f a d y e n hat sogar feststellen können, daß Bakterien zwar bei etwa —200° keine Lebensäußerungen mehr zeigen, daß sie aber ihre Lebensfähigkeit nicht verlieren. Leuchtbakterien, Cholerabakterien, Milzbrandbakterien usw. behielten ihre Lebensfähigkeit selbst noch bei einer Temperatur von — 252° C, also bei einer Temperatur, die nur noch 21° C über dem absoluten Nullpunkt liegt, an dem überhaupt alle chemischen Umsetzungen aufhören. Woran es liegt, daß die einen Organismen so hohe und so niedrige Temperaturen ertragen können, die anderen nicht, bleibt vorläufig eine offene Frage.

Literatur. ***Paul Bert***, *Recherches expérimentales sur l'influence que les changements dans la pression barométrique exercent sur les phénomènes de la vie. Comptes rendus 1878.* — ***W. Kochs***, *Kann die Kontinuität der Lebensvorgänge zeitweilig unterbrochen werden? Biolog. Zentralblatt Bd. X, 1890.* — ***Luciani***, *Das Hungern. Studien und Experimente am Menschen. Hamburg und Leipzig 1890.* — ***H. Molisch***, *Untersuchungen über das Erfrieren der Pflanzen. Jena 1897.* — ***Macfadyen***, *On the Influence of the temperature of liquid air on Bacteria. Proceed. Royal Society Vol. 66, 1900.* — ***Raoul Pictet***, *Das Leben und die niederen Temperaturen. Revue scientifique t. 52, 1893.* — ***A. Pütter***, *Die Athmung des Protozoën. Zeitschr. f. allgem. Physiol. Bd. V, 1905.* — ***Derselbe***, *Die Wirkung erhöhter Sauerstoffspannung auf die lebendige Substanz. Ebenda Bd. III, 1904.* — ***Regnart***, *Recherches expérimentales sur les conditions physiques dans les eaux. Paris 1891.* — ***Hoppe-Seyler***, *Physiologische Chemie, 1. Teil. Berlin 1877.* — ***Max Verworn***, *Allgemeine Physiologie. 5. Aufl. Jena 1909.* — ***Wallengren***, *Inanitionserscheinungen der Zelle. Zeitschr. f. allgem. Physiol. Bd. I, 1902.*

M. Verworn.

Lebensbedingungen der Pflanzen.

1. Einleitung: a) Begriff der Lebensbedingung. b) Gruppierung der Lebensbedingungen. 2. Wärme: a) Art der Einwirkung. b) Kardinalpunkte der Temperatur. c) Wärmetod. d) Kältetod, Erfrieren, Gefrieren. 3. Licht: a) Art der Einwirkung. b) Kardinalpunkte des Lichtes. c) Lichttod. 4. Wasser: a) Allgemeine Bedeutung. b) Austrocknungsfähigkeit.

1. Einleitung. 1a) B e g r i f f d e r L e b e n s b e d i n g u n g e n. Damit eine Pflanze existieren kann, ist nötig, daß eine ganze Anzahl äußerer Bedingungen erfüllt ist. So müssen die nötigen Nährstoffe vorhanden sein, Wärme ist außerdem notwendig und ebensowenig darf Feuchtigkeit und in sehr vielen Fällen auch das Licht fehlen. Nährstoffe, Wärme, Wasser und Licht bezeichnen wir deshalb als Lebensbedingungen. Ohne sie ist auf die Dauer kein Leben möglich.

Jeder aber, der sich schon mit der Kultur und Pflege von Pflanzen beschäftigt hat, weiß, daß mit der Realisierung dieser Faktoren an und für sich noch kein gutes Gedeihen garantiert ist. Dazu ist vielmehr nötig, daß der Pflanze die erwähnten äußeren Faktoren in einem ganz bestimmten Ausmaße zuteil werden. Die eine Pflanze muß stärker begossen werden als die andere, die eine hat den Schatten lieber, die andere das Licht und auch die Temperatur darf

nicht beliebig hoch sein. Jede Pflanze stellt an ihre Umgebung ganz bestimmte Anforderungen und nur dann, wenn die Ansprüche optimal befriedigt werden, gedeiht die Pflanze gut. Wie verschieden diese Ansprüche sind, lehrt schon ein flüchtiger Blick auf die geographische Verteilung der Pflanzen. Ich will da bloß kurz erinnern an die Wüstenpflanzen, an die Bewohner der Salzsümpfe und der Hochalpen. Was die eine Pflanzenart gut erträgt, das kann für eine andere tödlich sein.

1b) Gruppierung der Lebensbedingungen. Um uns ein Bild zu machen von der Bedeutung der äußeren Faktoren, die für die Existenz der Pflanze unbedingt nötig sind, können wir die Pflanze mit einer Fabrik vergleichen.

In einer Fabrik werden Stoffe zu Produkten mannigfacher Art verarbeitet, eventuell auch solche Produkte erzeugt, die direkt zur Vergrößerung der Fabrik verwendet werden können, z. B. wenn es sich um die Herstellung von Ziegelsteinen handelt. In analoger Weise bildet die Pflanze aus den aufgenommenen Nährstoffen die verschiedensten Stoffe, darunter auch solche, die als Bausteine zur Vergrößerung des pflanzlichen Gebäudes Verwendung finden. Die Nährstoffe sind also insofern allgemeine Lebensbedingung, als sie die stoffliche Grundlage für das vitale Geschehen liefern, doch ist hier nicht der Ort, auf die Ernährung näher einzugehen.

Der Besitz der nötigen Rohstoffe nützt einer Fabrik wenig, wenn ihre Maschinen nicht in Betrieb sind. Dazu aber muß die nötige Kraft, z. B. Elektrizität, vorhanden sein. Genau so verhält sich die pflanzliche Fabrik, ihr Energielieferant ist, bei grünen Pflanzen direkt, bei nicht grünen indirekt, das Sonnenlicht.

Gleichwie ferner in einer Fabrik die Betriebsenergie die Maschinen nicht bewegen kann, wenn nicht die Bewegung ausgelöst wird, was z. B. durch Oeffnen des Hahnes geschehen kann, der den Dampf ausströmen läßt, so braucht es auch zur Auslösung des Lebensgetriebes eines auslösenden Faktors, das ist die Wärme.

Für den pflanzlichen Betrieb ist ferner das Wasser unumgänglich nötig, ähnlich wie für die Herstellung der Produkte mancher, z. B. chemischer Fabriken.

So ist denn das pflanzliche Leben, wenn wir von den Nährstoffen absehen, worunter auch der zur Atmung nötige Sauerstoff enthalten ist, an drei äußere Faktoren gebunden, Wärme, Licht, Wasser, deren Bedeutung als allgemeine Lebensbedingung aber bei jedem der drei in anderer Richtung liegt, wie schon angedeutet wurde, und wie aus dem Folgenden noch näher hervorgehen wird. Wir betrachten zuerst die Wärme, dann das Licht und zuletzt das Wasser.

2. Wärme. 2a) Art der Einwirkung. Die Wärme liefert, wie schon angedeutet, nicht die Energie, die für die Unterhaltung des Lebensgetriebes der Pflanze nötig ist. Trotzdem kann die Pflanze die Wärme nicht entbehren. Diese Tatsache drückt man auch so aus, daß man die Wärme als formale Bedingung für das vitale Geschehen bezeichnet. Die Wirkung der Wärme können wir uns als Reizwirkung vorstellen; durch die Wärme werden die Lebensfunktionen nicht unterhalten, sondern bloß ausgelöst.

2b) Kardinalpunkte der Temperatur. Es ist nun nicht etwa gleichgültig, wie stark dieser Reiz ist, sondern das Leben spielt sich nur innerhalb ganz bestimmter Temperaturgrenzen ab. Jede Lebensfunktion verläuft am schnellsten bei einer bestimmten Temperatur, sie nimmt ab, wenn die Temperatur sinkt, und hört bei einem bestimmten Punkt auf, ohne daß dabei schon der Tod eingetreten ist. Ganz gleich liegen die Verhältnisse bei zunehmender Temperatur, auch hier wird ein Punkt erreicht, wo die betreffende Funktion aufhört. Würden wir das graphisch darstellen, indem wir die Temperaturen als Abszissen und die Intensitäten der betreffenden Lebensfunktion als Ordinaten auftragen, so bekämen wir eine Kurve, die von 0 bis zu einem höchsten Wert ansteigt und dann wieder bis 0 sinkt. Anfangspunkt, höchster Punkt und Endpunkt der Kurve heißen ihre Kardinalpunkte und die Temperaturen, bei welchen diese Kardinalpunkte liegen, bezeichnet man als Minimum, Optimum und Maximum der Temperatur.

Die Lage dieser drei Punkte ist bei verschiedenen Pflanzen recht verschieden. Als Beispiel können wir die Kardinalpunkte der Temperatur nehmen, die für das Wachstum bestimmt worden sind.

Für die meisten Süßwasseralgen liegt das Minimum etwa bei 0°, während bei Algen der arktischen Meere ein Wachstum selbst unter 0° möglich erscheint. Bei thermophilen Bakterien hingegen, die das andere Extrem vorstellen, liegt das Minimum zwischen 33 und 50°. Zwischen diesen beiden extremen Werten kommen alle möglichen Minima vor. Optima und Maxima variieren in analoger Weise, so daß im allgemeinen die Kardinalpunkte bei Pflanzen kalter Standorte tiefer liegen als bei solchen, die wärmere Orte besiedeln. Die folgende Tabelle mag das Gesagte noch näher illustrieren.

	Minimum	Optimum	Maximum
Hydrurus	0	10 und tiefer	unter 16
Ulothrix	0	unter 15	unter 24
Triticum vulgare	0—5	29	42
Penicillium glaucum	1,5	25—27	31—36
Acer platanoides	7—8	24	26
Phaseolus multiflorus	9	34	46
Aspergillus niger	7—10	33—37	40—43
Thermophile Bakterien	33—50	60—70	75

Bei der Mehrzahl der Landpflanzen liegt das Maximum zwischen 30 und 46°, bei den Sukkulenten aber bei 50 bis 52°.

Der Spielraum zwischen Minimum und Maximum ist ebenfalls sehr verschieden. Er beträgt bei Hydrurus etwa 16°, bei den meisten Landpflanzen 30 bis 45°, und steigt bei den Sukkulenten auf 50°.

Für verschiedene, in der gleichen Pflanze erfolgende physiologische Vorgänge sind die Kardinalpunkte ebenfalls verschieden hoch. Eine Temperatur, bei der ein Vorgang sich am lebhaftesten abspielt, braucht nicht auch für andere Vorgänge gleich günstig zu sein, So ist vielfach bei einer Temperatur, in der die Pflanze lebhaft wächst, die Kohlensäureassimilation etwas herabgesetzt, während die Atmung stark ist.

Aber auch für ein und dieselbe physiologische Funktion sind die Kardinalpunkte oft im selben Individuum verschieden, wenn wir verschiedene Organe in Betracht ziehen. Dahin gehört die Beobachtung, daß bei vielen unserer Frühlingspflanzen die Blüten durch viel niedrigere Temperaturen zum Wachstum gebracht werden, als die vegetativen Organe. Ein anderes Beispiel bietet der Schimmelpilz Penicillium. Seine Sporen keimen zwischen 1,5 bis 43°, das Mycel wächst zwischen 2,5 bis 40° und die Sporenbildung tritt ein zwischen 3 bis 40°.

Auch eine Abhängigkeit der Kardinalpunkte von äußeren Faktoren, wie Nahrung, Sauerstoff, Licht hat man konstruiert. Bei Penicillium z. B. lag das Temperaturmaximum für das Wachstum bei 31°, wenn der Pilz mit Zucker ernährt wurde, während es auf 35 bis 36° stieg, wenn statt des Zuckers Ameisensäure oder Glyzerin geboten war.

Zu alledem kommt noch, daß die Kardinalpunkte durch allmähliche Akkommodation verschiebbar sind. Bei Bacillus anthracis konnte durch allmähliche Akkommodation das Minimum von 12 bis 14° auf 10° herabgesetzt werden und in analoger Weise gelang es bei Bacillus fluorescens das Maximum von 35 auf 41,5 zu erhöhen. Eine solche Verschiebung der Kardinalpunkte ist aber wohl nur innerhalb enger Grenzen möglich, worauf zahlreiche Akklimatisationsversuche der Praxis hinzudeuten scheinen.

2c) Wärmetod. Steigt die Temperatur zu hoch, so stirbt die Pflanze. Damit ist aber nicht gesagt, daß die Ueberschreitung des Maximums schon den Tod zur Folge hat. In der Tat kann das Temperaturmaximum des Wachstums etwas überschritten werden, ohne daß vorläufig die Pflanze stirbt. Das Wachstum hört zwar auf, aber das Leben ist noch nicht erloschen, die Pflanze befindet sich bloß in einem Zustand der Starre. Wenn dieser Zustand zu lang anhält, so stirbt aber die Pflanze schließlich doch. Eine Ueberschreitung des Maximums um 1 bis 2° wirkt meistens bei kurzer Dauer schon schädlich, bei längerer tödlich. Doch läßt sich das nicht als durchwegs gültige Regel aufstellen, denn Penicillium erträgt viele Tage lang eine Temperatur, die etwa 1° über dem Maximum liegt. Im allgemeinen tritt der Tod um so früher ein, je stärker die Ueberschreitung des Maximums ist.

In bezug auf die Lage der Todespunkte herrschen große Verschiedenheiten. Viele Pflanzen sterben bei etwa 50°, bei anderen genügen schon tiefere Temperaturen, z. B. 35° bei der Saubohne (Vicia Faba) und 44° beim Roggen. In warmen Quellen lebende Algen sollen bis 60° ertragen können.

Je wasserreicher die Zellen sind, um so leichter werden sie geschädigt. Pflanzen und Pflanzenteile, die das Austrocknen vertragen, werden auch in hohen Temperaturen nicht getötet. So kann man lufttrockene Samen ohne Schädigung stundenlang auf 65 bis 80° erwärmen, während sie im gequollenen Zustand schon bei 50° sterben.

Am unempfindlichsten gegen hohe Temperaturen sind die Sporen vieler Bakterien. Die des Tuberkelbazillus sterben erst bei 85°, und die des Heubazillus kann man sogar 3 Stunden lang kochen, ohne daß sie ihre Keimfähigkeit einbüßen. Die Ursachen des Wärmetodes sind unbekannt. Immerhin kann es sich nicht um eine einfache Eiweißkoagulation handeln, da der Tod vielfach bei ganz niederen Temperaturen eintritt.

2d) Kältetod, Erfrieren, Gefrieren. Sinkt die Temperatur unter das Minimum, so wird die Pflanze kältestarr. In diesem Zustand kann sie nicht unbegrenzt verweilen, es tritt schließlich der Kältetod ein. Die Widerstandsfähigkeit gegen tiefe Temperaturen ist äußerst verschieden. So stirbt Episcia, nachdem sie 5 Tage bei + 1,4 bis + 3,7° gehalten wird. Kürbis, Ricinus, Bohne und Kartoffel erfrieren in einer Nacht, wenn die Temperatur auf — 2 bis — 4° sinkt. Widerstandsfähiger sind manche Unkräuter, wie Stelleria media, Senecio vulgaris, Urtica urens, die eine längere Abkühlung auf — 6 bis — 9° ver-

tragen. Doch gibt es Pflanzen, die noch widerstandsfähiger sind, wie Helleborus niger, der erst durch ein Sinken der Temperatur auf — 17° getötet wird.

Die Widerstandsfähigkeit gegen tiefe Temperaturen hängt teilweise von den übrigen Außenbedingungen und den vorhergegangenen Kulturbedingungen ab. Keimlinge, die bei 18 bis 20° erzogen waren, erfroren leichter als die bei 8° kultivierten, und Senecio vulgaris, Poa annua, Fumaria officinalis, die im November bis Dezember bis — 11° aushielten, starben schon bei — 9°, nachdem sie 15 Tage im Warmhaus gewesen.

Auch der Wassergehalt scheint eine Rolle zu spielen, insofern als wasserfreie Organe, Samen und Sporen, nicht getötet waren, als sie 5 Tage in einer Temperatur von — 200° und kürzere Zeit in — 250° verweilten.

Tritt der Tod in Temperaturen über 0° ein, so muß er erfolgen infolge von Veränderungen und Störungen im Protoplasma, die durch die betreffende Temperatur verursacht werden. Verwickelter aber sind die Erscheinungen, wenn die Pflanze erst in Temperaturen unter 0° abstirbt, denn in dem Fall tritt in der Pflanze Eisbildung ein und es ist a priori nicht zu sagen, ob die tiefe Temperatur oder das Eis die Todesursache ist.

Das Eis wird meist nicht im Zellinnern, sondern außerhalb der Zelle in den Intercellularräumen gebildet. Außerhalb der Zelle gefriert die dünne Wasserschicht, die die Zellwand überzieht und an den dampfgesättigten Intercellularraum grenzt. Durch diese Eisbildung wird das Gleichgewicht gestört und es strömt Wasser aus dem Zellinnern nach, das außen ebenfalls erstarrt. Es wird also der Zelle immer mehr Wasser entzogen. Das gleiche läßt sich beobachten, wenn man Spirogyrafäden unter dem Mikroskop gefrieren läßt. Durch die äußerliche Eisbildung wird den Zellen Wasser entzogen und sie schrumpfen ein.

Diese Erscheinungen haben einige Forscher zur Ansicht geführt, daß der Tod in Temperaturen unter 0 durch den Wasserentzug zustande kommt, der bei der Eisbildung eintritt, daß also der Kältetod ein Austrocknungstod sei.

Dieser Ansicht widerspricht nur scheinbar, daß der Todespunkt bei Temperaturen liegt, die z. T. tief unter 0° sind, denn der Zellsaft ist kein reines Wasser, sondern eine Lösung von verschiedenen Elektrolyten und Nichtelektrolyten. Der Gefrierpunkt einer wässerigen Lösung liegt nun aber, wie aus der physikalischen Chemie bekannt ist, nicht bei 0°, sondern tiefer, und zwar geht die Erniedrigung proportional dem osmotischen Druck. Sie beträgt für eine einmalige Lösung eines Nichtelektrolyten, wie z. B. Rohrzucker oder Traubenzucker, —1,86°. Mit der Ansicht, daß Kältetod mit Austrocknungstod identisch sei, steht auch die Tatsache im Einklang, daß manche Pflanzen und Pflanzenteile absterben, sobald sich Eis bildet. Das tun z. B. Kartoffeln, Zuckerrüben und Aepfel. Daß die Eisbildung und damit die Austrocknung in manchen Fällen die Todesursache ist, geht auch daraus hervor, daß Kartoffeln in — 2° lebendig bleiben, wenn die Eisbildung verhindert wird, während sie, wenn sich Eis bildet, bei — 1° sterben.

Alles das reicht nun aber doch nicht hin, um die Ansicht, daß Kältetod gleich Austrocknungstod sei, zu verallgemeinern. In einzelnen Fällen trifft es sicherlich zu, in vielen anderen aber ebenso sicher nicht, wie im folgenden noch näher auseinandergesetzt werden soll.

Viele Pflanzen ertragen das Gefrieren und leben nach dem Auftauen wieder normal weiter. Unsere Bäume gehören dahin, die im harten Winter durchgefrieren. Aber auch Kräuter gibt es, die so widerstandsfähig sind. Unkräuter, die im Winter wachsen, wie Stellaria media und Senecia vulgaris ertragen das Durchfrieren glatt, können sogar eventuell mehrmals hintereinander auftauen und wieder gefrieren. In allen diesen Fällen hat also der Wasserentzug, der mit der Eisbildung notwendig eintreten mußte, keine tödlichen Folgen.

Im gefrorenen Zustand sind die genannten Pflanzen aber nicht unempfindlich und unveränderlich. Das ergibt sich schon daraus, daß sie schließlich doch sterben, wenn sie zu lange im gefrorenen Zustande bleiben. Sie können aber auch getötet werden durch eine weitere Senkung der Temperatur. In diesen beiden Fällen müssen wir also annehmen, daß die tiefe Temperatur eine direkte tödliche Wirkung auf das Plasma ausübte.

Man hat ferner schon lange die Erfahrung gemacht, daß der Erfrierpunkt der Kartoffeln um so tiefer liegt, je kälter der Raum war, in dem sie vorher lagerten. Durch die Kaltlagerung der Kartoffeln werden sie süß, es wird Stärke in Zucker umgesetzt. Dadurch wird der osmotische Druck des Zellsaftes erhöht, und damit parallel der Gefrierpunkt erniedrigt, und man hatte geglaubt, damit die Erniedrigung des Erfrierpunktes erklären zu können, wobei natürlich unter Gefrierpunkt die Temperatur verstanden ist, bei der in der Pflanze Eis gebildet wird, während Erfrierpunkt die Temperatur bezeichnet, bei der die Pflanze abstirbt. Durch neuere Untersuchungen aber hat sich nun gezeigt, daß diese Annahme irrig ist. Die Herabsetzung des Gefrier-

punktes beim Kaltlagern der Kartoffel ist nämlich lange nicht so stark, wie die Herabsetzung des Gefrierpunktes, es fallen Gefrier- und Erfrierpunkt nicht zusammen. Es kann also auch in dem Fall der Kältetod kein Austrocknungstod sein.

Zu analogen Resultaten führten Untersuchungen an Schimmelpilzen. Diese Pilze sind ein sehr geeignetes Objekt, da man ihren Turgor durch Kultur auf verschieden hoch konzentrierten Nährlösungen innerhalb weiter Grenzen beliebig ändern kann. Bei diesen Versuchen ergab sich, daß Aspergillus bei Kultur auf 1 bis 10 % Traubenzucker abstarb, bevor der Zellsaft gefroren war, in 20 % Traubenzucker fielen Gefrier- und Erfrierpunkt annähernd zusammen, in 30, 40 und 50 % hingegen fielen sie nicht zusammen, es lag hier der Erfrierpunkt tiefer als der Gefrierpunkt. Also nur in einem Fall, wo Erfrier- und Gefrierpunkt zusammenfielen, kann die Austrocknung als Todesursache angesprochen werden.

Aus den eben genannten Untersuchungen ging ferner hervor, daß der Erfrierpunkt mit der Zunahme des Turgors stieg. Daraus geht hervor, daß die Größe des Turgors doch von Einfluß auf die Kältresistenz ist. Dieser Einfluß kann aber nicht chemisch-physikalisch sein, wie man früher angenommen hat, denn Turgorerhöhung und Gefrierpunktserniedrigung hätten in dem Fall parallel gehen müssen, was nicht der Fall war. Der Einfluß des Turgors muß also in anderer Richtung liegen.

Ferner zeigten diese Schimmelpilze, daß die Eisbildung in der Nährlösung nicht ohne Bedeutung ist. Wurde sie verhindert, so lag der Erfrierpunkt tiefer.

Aus dem Mitgeteilten geht wohl so viel hervor, daß der Kältetod auf zwei verschiedene Arten zustande kommt, durch Austrocknen, infolge Wasserentzug bei der Eisbildung, und durch direkte Wirkung der tiefen Temperatur auf das Protoplasma. Bloß die letzte Wirkung wäre dann im strengen Sinne der Kältetod.

3. Licht. 3a) Art der Einwirkung. In ganz anderer Weise ist das Licht allgemeine Lebensbedingung als die Wärme. Während diese niemals entbehrt werden kann, so verhält es sich mit dem Licht anders, denn es gibt viele Bakterien und Pilze, die dauernd im Dunkeln leben und gedeihen.

Die Wirkung des Lichtes, die seine Bedeutung als Lebensbedingung ausmacht, setzt sich aus einer Anzahl Teilwirkungen zusammen. Für die grünen Pflanzen ist es absolut unentbehrlich, da sie nur im Lichte assimilieren, aus Kohlensäure und Wasser organische Stoffe herstellen können. Indirekt notwendig ist es aber auch für die nichtassimilierenden Pflanzen, da sie ganz oder z. T. auf die organischen Stoffe angewiesen sind, für deren Aufbau in der grünen Pflanze das Licht die Energie liefert.

Mit dieser Bedeutung des Lichtes stimmt überein, daß Lichtentzug an und für sich nicht tödlich wirkt, wie Wärmeentzug. Sterben grüne Pflanzen bei Lichtentzug, so ist das keine direkte Wirkung des Lichtes, sondern ein Hungertod infolge der Unterdrückung der CO_2-Assimilation.

Eine andere Wirkung des Lichtes gibt sich darin zu erkennen, daß das Wachstum in sehr vielen Fällen im Lichte geringer ist als im Dunkeln. Dazu kommt weiter eine formative Wirkung des Lichtes. Läßt man Pflanzen, die mit allen Nährstoffen wohl versehen sind, im Dunkeln wachsen, so nehmen sie abnorme Gestalt an. Die Internodien und Blattstiele werden sehr stark gestreckt und die Blattspreiten bleiben klein. Daß hierbei wirklich eine direkte Lichtwirkung vorliegt, ergibt sich auch daraus, daß die beschriebene Erscheinung auch eintritt, wenn die Pflanzen in rotem Licht gehalten werden, wo sie doch assimilieren können.

Neben den erwähnten Wirkungen scheint nun das Licht in einigen Fällen auch eine ähnliche Rolle als auslösender Faktor zu spielen wie die Wärme. Man hat nämlich festgestellt, daß manche Samen im Dunkeln gar nicht keimen, sondern nur, wenn sie belichtet sind. So verhalten sich die Samen des epiphytischen Rhododendron javanicum, ebenso aber auch die unserer einheimischen Alpenrosen, Rhododendron hirsutum und Rhododendron ferrugineum. In anderen Fällen trat die Keimung im Dunkeln zwar auch ein, wurde aber durch das Licht wesentlich gefördert. Das war z. B. der Fall bei Serracenia flava. Diese Wirkung des Lichtes kann nicht assimilatorischer Art sein, sondern es muß sich um eine spezifische Reizwirkung handeln, denn wenn wasserdurchtränkte Samen des Tabaks nur eine Stunde belichtet werden, so keimen sie nachher auch im Dunkeln.

3b) Kardinalpunkte des Lichtes. Aus den vorhergehenden Auseinandersetzungen ergibt sich, daß ein Lichtminimum und ein Lichtoptimum im gleichen Sinne wie das Minimum und Optimum der Temperatur, wenn wir von der Beeinflussung der Samenkeimung absehen, nicht existieren kann.

Ebenso ergibt sich aber auch, daß die lichtbedürftigen Pflanzen sich nach dem Licht richten müssen. Für sie existiert ein ökologisches Minimum und Optimum. Diese Kardinalpunkte entspringen aber nicht einer direkten Wirkung des Lichtes, sondern sie sind die Resultante der verschiedenen Lichtwirkungen, der assimilatorischen, der formativen, der Wirkung auf das Wachs-

tum, auf die Transpiration und vielleicht auch noch anderer Wirkungen.

Es ist deshalb nicht weiter verwunderlich, daß die lichtbedürftigen Pflanzen in der freien Natur für ihr normales Gedeihen eine bestimmte Lichtintensität verlangen, so daß sie nicht mehr existieren können, wenn die Lichtintensität einen bestimmten minimalen Wert erreicht hat.

Schon lange ist ja bekannt, daß es Licht- und Schattenpflanzen gibt und wir verfügen heute über eine große Zahl exakter Bestimmungen des Lichtgenusses der Pflanzen unter den natürlichen Vegetationsbedingungen. Bei diesen Bestimmungen mißt man die Lichtintensität auf photographischem Wege nach der Methode von Bunsen-Roscoe, die von Wiesner für diese Zwecke verbessert wurde, und gibt sie in Bunsen-Roscoe-Einheiten an. Zugleich bestimmt man den Bruchteil des Gesamtlichtes, der der Pflanze zukommt und bezeichnet das als den relativen Lichtgenuß.

Im folgenden mögen einige Beispiele angeführt sein (die Messungen gelten für Wien).

	Relativer Lichtgenuß	Intensitäts-maximum
Buxus sempervirus	1—$^1/_{100}$	0,012
Fagus silvatica	1—$^1/_{85}$	0,015
Acer campestre	1—$^1/_{43}$	0,030
Populus nigra	1—$^1/_{11}$	0,118
Betula verrucosa	1—$^1/_{9}$	0,144

Während in diesen Angaben nur Maximum und Minimum berücksichtigt sind, so sollen im folgenden auch einige Angaben für das Optimum gemacht werden.

Die Schattenpflanze Prenanthes purpurea hat einen relativen Lichtgenuß von $^1/_{10}$ bis $^1/_{30}$, ihr Optimum liegt bei $^1/_{18}$. Sedum acre hingegen, das auf sonnigen Standorten wächst, hat einen Lichtgenuß von 1 bis $^1/_{21}$, und das Optimum bei 1.

Mit zunehmender Höhe über dem Meer und zunehmender geographischer Breite steigt der Lichtgenuß. Für Betula nana wurden folgende Werte gefunden

	Relativer Lichtgenuß	Absoluter Lichtgenuss
Christiania	1—$^1/_{3,4}$	1,150—0,038
Tromsö	1—$^1/_{2,2}$	0,850—0,386
Spitzbergen	1	0,750

3c) Lichttod. Tritt eine zu starke Erhöhung der Lichtintensität ein, so hört das Wachstum auf und die Pflanze geht schließlich zugrunde. Dieser Lichttodespunkt existiert bei allen Pflanzen, seine Lage aber ist sehr verschieden.

Schattenpflanzen gehen in direktem Sonnenlicht zugrunde. Das gleiche gilt für viele Bakterien. Bei Pflanzen sonniger Standorte hingegen wird das tödliche Maximum erst erreicht, wenn das Sonnenlicht durch Linsen konzentriert wird.

4. Wasser. 4a) Allgemeine Bedeutung. Das Wasser ist in verschiedener Hinsicht als allgemeine Lebensbedingung wichtig. Es ist ein unentbehrlicher Nährstoff, worauf hier nicht näher einzugehen ist. In den höher organisierten Pflanzen spielt es eine wichtige Rolle als Transportmittel. Eine weitere allgemeine Bedeutung ist chemischer Art, was ohne weiteres klar ist, wenn wir daran denken, daß so viele chemische Reaktionen nur bei Gegenwart von Wasser möglich sind. Neben diesem chemischen ist der physikalische Einfluß von ebenso großer Bedeutung. Imbibitions- und Quellwasser, die Zellwände und Protoplasma durchtränken, sind für die Abwickelung der Lebensvorgänge unerläßlich und im Innern der Zelle wäre die Herstellung des osmotischen Druckes ohne Wasser unmöglich.

4b) Austrocknungsfähigkeit. Verliert eine Pflanze in ihren oberirdischen Teilen Wasser, ohne daß von der Wurzel aus für Nachschub gesorgt wird, so welkt die Pflanze. Dieser Wasserentzug braucht nicht notwendig den Tod herbeizuführen. Viele Pflanzen können große Wassermengen verlieren und sterben erst, wenn ihnen etwa die Hälfte ihres Wassers entzogen wird. Gewisse Sukkulenten können sogar, ohne Schaden zu nehmen, einen Wasserverlust bis zu 90 % vertragen.

Das Höchste leisten aber die Pflanzen, die ein völliges Austrocknen vertragen. Moose und Flechten können so trocken werden, daß sie pulverisierbar sind. Trotzdem leben sie weiter, sobald sie wieder mit Wasser befeuchtet werden, das sie auch nach längerer Dürre lebhaft aufnehmen, da ihre Membranen auch im lufttrockenen Zustand leicht benetzbar bleiben.

Auch höhere Pflanzen, wie manche Selaginellen, ertragen das Austrocknen ohne Schaden zu nehmen.

Die meisten Pflanzen allerdings, die auf wasserarmen Standorten wachsen, haben sich durch mannigfaltige Einrichtungen vor Wassermangel geschützt. Es sei hier bloß kurz erinnert an die Wasserspeicher der Sukkulenten, an die Beschränkung der transpirierenden Flächen durch Verkleinerung der Blattspreiten und die mannigfachen anderen Einrichtungen zur Beschränkung zu starker Transpiration, wie Verdickung der Cuticula, Einsenkung der Spaltöffnungen usw.

Literatur. ***A. Apelt***, *Neue Untersuchungen über den Kältetod der Kartoffel. Diss. Halle a. S. 1907.* — ***H. Baetzko***, *Untersuchungen über das Erfrieren von Schimmelpilzen. Jahrb. f. wiss. Botan., 47, 1909, S. 57.* — ***E. Heinricher***,

Beeinflussung der Samenkeimung durch das Licht. Wiesner-Festschrift, Wien 1908. — **L. Jost,** *Vorlesungen über Pflanzenphysiologie. II. Aufl. Jena 1908.* — **H. Molisch,** *Untersuchungen über das Erfrieren der Pflanzen. Jena 1897.* — **W. Pfeffer,** *Pflanzenphysiologie, Bd. II. Leipzig 1904.* — **A. Schimper,** *Pflanzengeographie. Jena 1898.* — **Warning-Johannsen,** *Lehrbuch der allgemeinen Botanik. Berlin 1909.* — **J. Wiesner,** *Der Lichtgenuß der Pflanzen. Leipzig 1907.*

A. Tröndle.

Leber.

1. Anatomie der Leber: a) Makroskopische Anatomie. b) Histologischer Bau. 2. Vergleichende Physiologie der Leber. 3. Chemische Zusammensetzung der Leber: a) Gewicht. b) Wassergehalt. c) Aschegehalt. d) Fettgehalt. e) Eiweißgehalt. f) Fermente. 4. Beziehung der Leber zum Kohlehydratstoffwechsel (Glykogen): a) Ort der Bildung des Glykogens. b) Chemische Eigenschaften des Glykogens. c) Menge des Glykogens in der Leber. d) Der Ursprung des Glykogens: α) Synthetische Bildung des Glykogens. β) Die Muttersubstanzen des Glykogens. e) Der Abbau des Glykogens α) Die Tätigkeit von Fermenten. β) Der Einfluß des Nervensystems. 5. Diabetes (Glykosurie): a) Physiologische Glykosurie. b) Experimenteller Diabetes: α) Phloridzindiabetes. β) Adrenalindiabetes und Salzglykosurie. γ) Pankreasdiabetes. c) Diabetes mellitus (Zuckerharnruhr). d) Herkunft des Zuckers. 6. Die Beziehung der Leber zum Eiweißstoffwechsel: a) Auf- und Abbau von Eiweiß in der Leber. b) Harnstoffbildung in der Leber. c) Harnsäurebildung in der Leber. d) Bildung der Aetherschwefelsäuren. 7. Das Verhalten der Leber bei Vergiftungen. 8. Die Galle: a) Eigenschaften und Zusammensetzung der Galle. b) Herkunft der einzelnen Gallenbestandteile: α) Gallensäuren. β) Gallenfarbstoffe. c) Die Sekretion der Galle. d) Die Bedeutung der Galle für die Verdauung. e) Rückresorption von Galle und ihre Folgen (Ikterus). f) Bildung von Gallensteinen.

Unter den Anhangsdrüsen des Magendarmkanals spielt bei den Wirbeltieren die Leber nicht nur wegen ihrer Größe, sondern auch wegen ihrer Bedeutung für die Verdauung und wegen ihrer eigenartigen Stellung im Getriebe des intermediären Stoffwechsels eine ganz besondere Rolle. Zu dieser Rolle ist sie in erster Linie dadurch befähigt, daß ihr durch die Pfortader das ganze aus den Verdauungsorganen stammende und mit den dort aufgenommenen Stoffen beladene Blut zugeführt und jedes einzelne Leberläppchen von Blutkapillaren umspült und durchspült wird, so daß jede einzelne Zelle in innigste Berührung mit diesem Blute gelangt. Deshalb ist für das Verständnis der Funktion dieses Organs die Kenntnis seiner anatomischen Verhältnisse von besonderer Wichtigkeit.

1. Anatomie der Leber. 1 a) Makroskopische Anatomie. Die Leber des Menschen und der höheren Wirbeltiere ist ein Organ von dunkelbraunroter Farbe, dessen Form der Räumlichkeit angepaßt ist, in der es liegt. Daher ist ihre obere Fläche, der Konkavität des Zwerchfells entsprechend, gewölbt, ihre untere Fläche konkav. Die Leber ist durch eine Reihe von Furchen in an Zahl und Größe verschiedene Lappen geteilt, die bei den verschiedenen Tieren und auch bei den einzelnen Individuen variieren.

Beim Menschen unterscheidet man vier Lappen, indem die obere konvexe Fläche durch eine Inzisur in einen größeren Lobus dexter und einen kleineren Lobus sinister geteilt wird. Die untere konkave zeigt zwei

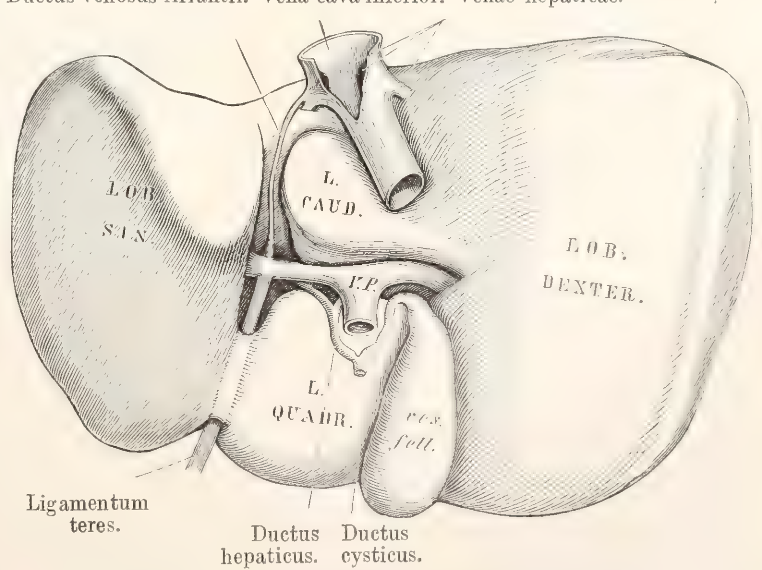


Fig. 1. Leber von hinten und unten. $^1/_3$ natürliche Größe. Nach Gegenbaur.

sagittale Furchen, die durch eine quere Grube, Porta hepatis, miteinander verbunden sind. Auf diese Weise entstehen hier vier Lappen; außer dem Lobus sinister und dexter noch der Lobus quadratus und Lobus caudatus (Fig. 1).

In die Porta hepatis münden 1. die Pfortader, welche sich in die beiden Aeste spaltet, die in die beiden großen Leberlappen gehen; 2. die kleinere Arteria hepatica; 3. die hier austretenden Ductus hepatici, welche sich zu einem gemeinschaftlichen Ductus hepaticus vereinigen, der dann meist noch in der Leberpforte den Ductus cysticus, den Ausführungsgang der Gallenblase, die in einer flachen Grube der unteren Leberfläche eingebettet ist, aufnimmt. Der gemeinsame Gang, Ductus choledochus, mündet dann, gewöhnlich unter Vereinigung mit dem Ausführungsgang des Pankreas in einer Schleimhautfalte des Duodenums.

1b) Histologischer Bau. Die Leber gehört zu den zusammengesetzt tubulösen Drüsen; d. h. sie besteht aus Zellen, die rings um Drüsenräume angeordnet sind, welche ein sehr feines Kapillarnetz bilden; indem das Lumen der feinsten interlobulären Gallengänge sich direkt in die Leberläppchen fortsetzt. Allmählich konfluieren diese zu den stärkeren Gallengängen mit besonderer Wandung, bis immer größere Zweige sich zu einem einzigen Ausführungsgang vereinigen (Fig. 2 und Fig. 3).

Gallenkanälchen an der Kante einer Leberzelle

Leberzelle.

Gallenkanälchen

Blutkapillaren

Fig. 2. Durchschnitt durch eine Kaninchenleber mit injizierten Gallenkanälchen. Nach Stöhr.

Die besondere histologische Struktur des Leberparenchyms ist durch die Anordnung der Blutgefäße bestimmt, welche zusammen mit dem Bindegewebe, das mit der Glissonschen Kapsel, der aus Bindegewebe bestehenden Hülle der Leber, in Verbindung steht, das Stützgerüst der Leberzellenbalken bilden.

Von den Pfortaderästen, den Venae interlobulares, entspringen zahlreiche Kapillaren, welche in die Läppchen eindringen, wo sie zwischen den Leberbalken gelegen sind und vielfach anastomosieren (Venae intralobulares) und schließlich zu einer Vena centralis zusammenfließen (Fig. 4).

Die Aeste der Leberarterie verlaufen mit denen der Pfortader und verzweigen sich in

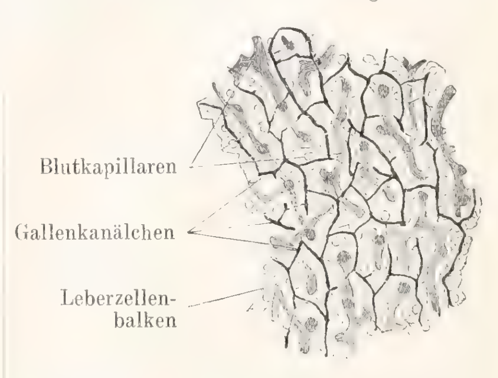


Fig. 3. Schnitt durch eine Kaninchenleber mit injizierten Pfortaderkapillaren und Gallenkanälchen. Nach Stöhr.

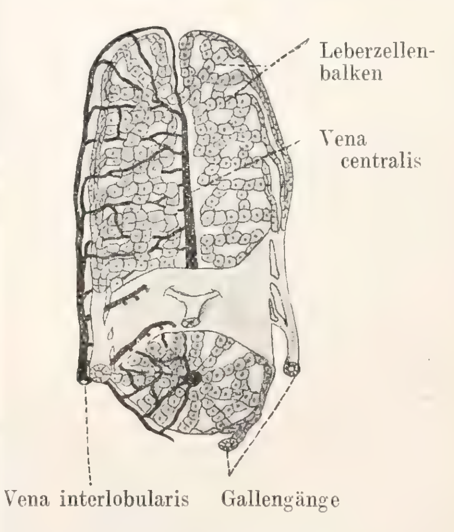


Fig. 4. Schema eines Leberläppchens. Nach Stöhr.

dem interlobulären Gewebe. Die aus der Arterie und deren Kapillare hervorgegangenen Venen münden in die Venae interlobulares (Fig. 5).

Die intralobularen Venen und die Zentralvenen bilden den Anfang der abführenden Lebervenen, welche zu den Venae sublobulares zusammenfließen, sich zu großen Zweigen vereinigen und schließlich als Lebervene in die untere Hohlvene einmünden. Durch diese besondere Verteilung der Kapillarbildung und Wiedervereinigung der Blutgefäße und Gallenkanälchen wird das Leberparenchym

in eine entsprechende Anzahl von Läppchen oder Acini mit einem Durchmesser von 1 bis 2 mm und der Gestalt eines oben abgerundeten, unten quer abgestutzten Prismas geteilt. Diese Acini sind besonders beim Schwein auf der Oberfläche oder dem Durchschnitt mit bloßem Auge sichtbar. Jedes Läppchen besteht aus Leberzellenbalken und ist von dem benachbarten durch Bindegewebe geschieden, das von der Glissonschen Kapsel her zwischen die Leberlappen eindringt. Die Leberzellen sind unregelmäßige polygonale Gebilde ohne Membran und bestehen aus körnigem Protoplasma und einem oder mehreren Kernen. Ihre Größe beträgt beim Menschen 18 bis 26 μ. Je nach der Art der Ernährung ist der Inhalt mit Fett, Glykogen, Pigmentschollen in größerem oder geringerem Maße erfüllt. Die Lymphgefäße begleiten die Pfortaderäste, setzen sich in perilobulär gelegene Lymphräume fort und treten in das Innere der Leberläppchen. Auch die größeren sublobulären Venen sind von Lymphgefäßen begleitet, die mit einem Lymphgefäßnetz in Verbindung stehen, welches sich in der Leberkapsel befindet.

Die Nerven der Leber sind Aeste des Vagus und des Plexus solaris des Sympathicus. Sie dringen mit den Aesten der Pfortader und der Leberarterie in das Innere des Lebergewebes ein. Sie bestehen vorzugsweise aus marklosen Nerven und endigen entweder an den Gefäßen oder hören als feine Fäserchen zwischen den Leberzellen auf.

2. Vergleichende Physiologie der Leber. Während bei den höheren Tieren, den Wirbeltieren, die Leber anatomisch und physiologisch dieselbe Bedeutung hat wie Aufspeicherung von Reservestoffen, chemische Umsetzung des intermediären Stoffwechsels, Schutzwirkung, Ausscheidung von Exkretstoffen, zeigen sich im Gegensatz dazu bei den niedrigsten Wirbellosen Protozoen, Spongien, Coelenteraten, Echinodermen, Würmern überhaupt keine derartige vielzellige Differenzierungen einzelner Verdauungsdrüsen, wenn auch manche von ihnen schon typische Verdauungsfermente produzieren. Erst bei den Mollusken, den Crustaceen und bei einzelnen Arachnoiden finden wir ein Organ, das man früher wegen einer gewissen Aehnlichkeit mit der Wirbeltierleber in bezug auf seine anatomische Lage und sein makroskopisches Aussehen auch

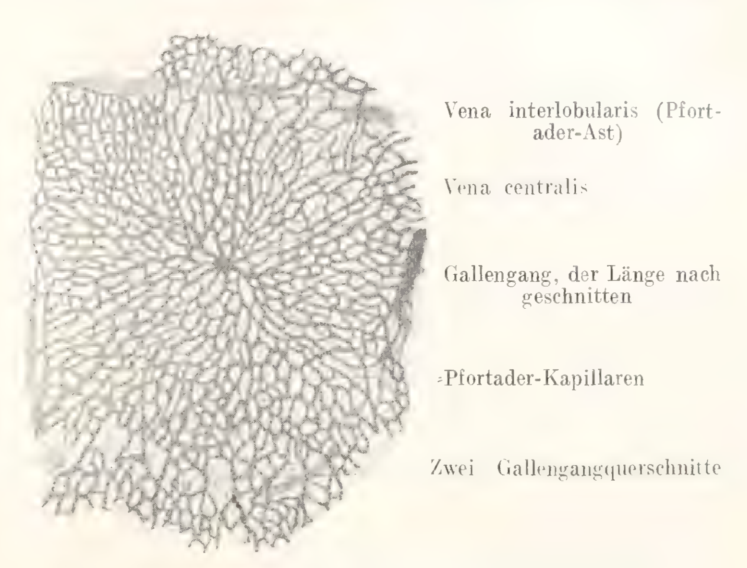


Fig. 5. Schnitt durch die Leber eines erwachsenen Menschen. Nach Stöhr.

Leber genannt hat, welches sich aber von der Wirbeltierleber hauptsächlich dadurch unterscheidet, daß es gleichzeitig ein Resorptionsorgan ist. Bei den Wirbeltieren steht die Leber nicht in direkter Kommunikation mit dem Magendarminhalt, sondern dessen Produkte werden vielmehr durch ein besonderes Gefäßsystem dem Pfortadersystem der Leber zugeleitet. Die Galle hat eine reine sekretabführende Funktion. Die Leber hat im wesentlichen keine Verdauungsfermente zu liefern. Bei den genannten Wirbellosen sind Mitteldarmdrüse, früher Leber genannt, und Darm zuweilen durch eine breite Kommunikation miteinander verbunden, so daß man jene bei gewissen Arten direkt als Ausstülpung des Darmes bezeichnet hat. In ihr findet die Produktion von Verdauungsfermenten und die Resorption von Nahrungsstoffen statt und außerdem steht sie noch in besonderer Beziehung zum Kalkstoffwechsel. Das Vorkommen von Gallenbestandteilen ist bisher nicht festgestellt.

Durch die Untersuchungen von Biedermann und Moritz, Cuenot und Bertkau ist nachgewiesen worden, daß dieses Organ, jetzt besser Mitteldarmdrüse

genannt, sowohl bei den Mollusken, wie bei den Crustaceen und gewissen Arachnoiden eine dreifache Funktion ausübt.

Es dient zunächst zur Produktion von Fermenten, welche lösend und spaltend auf die aufgenommenen Nahrungsstoffe Eiweiß, Kohlehydrate und Fette wirken. Eine zweite Funktion ist die der Resorption von in Lösung gebrachten Nahrungsstoffen. Bei den Mollusken werden Kohlehydrate, Fette, Eiweißstoffe, Farbstoffe usw, nachdem sie durch Fermente in Lösung gebracht sind, durch die Zellen der Mitteldarmdrüse aufgenommen. Aehnliche Verhältnisse hat man bei den Crustaceen und Arachnoiden nachgewiesen. Die Mitteldarmdrüse hat drittens eine wichtige Funktion als ein Organ zur Aufspeicherung von Reservestoffen, dazu gehören in erster Linie Kohlehydrate, die ebenso wie bei den Wirbeltieren als Glykogen aufgespeichert werden. Auch bei Crustaceen hat man in der Mitteldarmdrüse eine Anhäufung von Glykogen gefunden. Ob auch eine Aufspeicherung von Eiweiß stattfindet, ist noch nicht sicher erwiesen; dagegen dient sie wenigstens bei den Mollusken auch als Reserveorgan für Fett.

3. Chemische Zusammensetzung der Leber. 3a) Gewicht der Leber. Als mittleres Lebergewicht beim Menschen wird von Vierordt 1579 g für den Mann und 1526 g für die Frau angegeben. Setzen wir das Lebergewicht in Beziehung zum Körpergewicht, so ergibt sich nach Frerichs 2,5 bis 4,2 %. Bei Kindern ist das Lebergewicht relativ größer, nach Cramer 3,0 bis 4,2 %. Aus den Vierordtschen Tabellen läßt sich der Einfluß des Alters auf das Lebergewicht deutlich erkennen, bei Neugeborenen 4,57 %, bei Erwachsenen 2,75 %. Dieselben Beobachtungen sind von Gerhartz in seinen experimentellen Wachstumsstudien an Hunden gemacht worden. Der Hund am Ende der ersten Lebenswoche 3,9 %, der zweiten 4,3 %, der 34. 3,64 %, der erwachsene Hund 2,65 %.

Beim Hunde sind auch andere Einflüsse auf die Beziehung des Lebergewichts zum Körpergewicht untersucht worden. Nach den Untersuchungen von Pavy beträgt bei Fleischfütterung das Lebergewicht 3 bis 4,7, im Mittel 3,3 %. Bei Kohlehydratfütterung 4,8 bis 9,5, im Mittel 6,4 % des Körpergewichts. Schöndorff fand bei Kohlehydratmästung 2,49 bis 12,43, im Mittel 6,34 %.

Gerhartz hat ferner das Verhältnis bestimmt bei jungen Hunden, die mit Hundemilch, also natürlich, und solchen, die mit Kuhmilch ernährt sind; im ersten Falle findet er 3,91 % und 4,35 %, im letzten Falle 6,26 %. Während bei starker Muskelarbeit nach Külz das Gewicht der Leber absinkt, im Mittel 2,1 % des Körpergewichts, findet Gerhartz keine Abnahme des relativen Lebergewichts:

Ruhehund 3,12 %, Arbeitshund 3,33 %
„ 3,11 „ „ 5,00 „

Bei intensivem Hungern kann das Gewicht sehr stark sinken. Pflüger fand bei einem Hund nach 28 tägigem Hungern 1,5 %, Schöndorff nach 38 tägigem 1,94 %. Andererseits fand Pflüger bei Hunden nach 70 tägigem Hungern 3,1 % und nach 72 tägigem 2,2 %.

Für Kaninchen gibt Weinland 2,5 bis 4,2 %, für die Katze Böhm und Hoffmann 1,8 bis 6,25 % an.

Der Wassergehalt der Leber scheint keinen großen Schwankungen unterworfen zu sein. Für den Menschen werden 74,6 bis 79,8 % angegeben. Nur bei Neugeborenen ist der Wassergehalt der Leber entsprechend dem größeren Wassergehalt des ganzen Tieres größer. Auch beim länger dauernden Hungern kann der Wassergehalt der Leber zunehmen.

Bezüglich des Aschegehalts liegt nur eine geringe Anzahl von Untersuchungen vor. Bei Neugeborenen ist der Eisengehalt der Leber bedeutend größer als bei Erwachsenen gefunden worden, und mit der Abnahme des Eisens geht eine Zunahme des Calciums einher, so daß man bei Rinderföten denselben niedriger findet als bei Kälbern; im späteren Alter liegen die Verhältnisse dann wieder umgekehrt.

Der Fettgehalt der Leber ist von einer Reihe von Umständen abhängig, die ihn in weitem Maße variieren können.

Dennstädt und Rumpf geben für die menschliche Leber als höchsten Wert 4,3 %, Noël Paton etwa 3 % an.

Bei Hunden findet man ganz bedeutende Unterschiede, die von der Art der Nahrung abhängig sind. Rosenfeld fand bei 5 tägigem Hungern 10 %, Schöndorff nach 38 tägigem Hungern 14,2 %, Profitlich nach 73 tägigem Hungern 9,84 % in der Trockensubstanz.

Sehr hohe Werte für den Fettgehalt findet man in der Leber von Seetieren. Rosenfeld fand in der lufttrockenen Leber von Acanthias vulgaris 82,9 % Fett, in der 8,5 kg schweren Leber des Eishaies Lemargus borealis 6 kg Fett.

Auch bei Vergiftungen mit Phosphor, Phloridzin, Alkohol, Arsen, kann der Fettgehalt der Leber abnorm hohe Werte zeigen.

Rosenfeld fand bei phloridzinvergifteten Hunden 25 bis 75 % Fett, Pflüger und Junkersdorf und Junkersdorf fanden bei mehr als 100 phloridzinvergifteten Hunden große Schwankungen. Die niedrigsten Werte waren 12 bis 15 %,

mittlere Werte 40 bis 50 %, sehr hohe Werte 61,8, 68,0, 71,54, 74,1, der höchste 74,8 %. Entsprechend dem hohen Fettgehalt war der Wassergehalt ganz bedeutend gesunken (38 bis 50 %).

Eine ähnliche Verfettung der Leber ist auch bei Hunden nach Pankreasexstirpation beobachtet worden, wo man auch Werte bis zu 47,7 % (Pflüger) gefunden hat.

Außer dem Fett finden sich in der Leber mehr oder weniger große Mengen Lezithin, Jekorin, Milchsäure, Glukuronsäure, Chondroitinschwefelsäure, Aceton und β-Oxybuttersäure, Purinbasen, Harnstoff, Harnsäure, Leucin, Cystin usw.

Die Eiweißkörper der Leber bestehen aus Gemengen von löslichen Globulinen und Nukleoproteiden. Außerdem enthält die Leber noch verschiedene Mengen schwer löslicher Eiweißstoffe und gewisse eisenhaltige Proteinstoffe. Der Stickstoffgehalt der glykogen-, fett- und aschefreien Hundeleber beträgt nach Profitlich im Mittel 15,49 % und das Verhältnis Stickstoff zu Kohlenstoff 3,21 % bei Hundeleber und 3,13 % bei Ochsenleber, also fast dieselben Werte wie im Fleisch.

Ebenso wie die Leber eine Vorratskammer für Fett und, wie wir später sehen werden, eine solche für Glykogen ist, scheint sie nach den Untersuchungen von Seitz eine Vorratskammer für Eiweiß zu sein.

Außer den bisher erwähnten Stoffen, die sich in der Leber finden, kommt noch eine Reihe von Fermenten in derselben vor, die die Leber zu dem großen chemischen Laboratorium des tierischen Organismus stempeln; und wenn man auch noch nicht für jede chemische Umsetzung, als deren Ort wir die Leber annehmen, das betreffende Ferment entdeckt hat, so sind doch bisher folgende Fermente in ihr nachgewiesen: Proteolytische Enzyme, die sich besonders bei der Autolyse wirksam zeigen, Arginase, ein harnstoffbildendes Ferment, Oxydasen, Katalasen, glykolytisches Ferment, esterspaltende Lipasen, Diastasen usw.

4. Beziehung der Leber zum Kohlehydratstoffwechsel (Glykogen). 4a) Ort der Bildung des Glykogens. Eine ganz besondere und höchst wichtige Aufgabe hat die Leber für den Stoffwechsel der Kohlehydrate. Durch die Fermente des Magendarmkanals werden die Kohlehydrate der Nahrung in den leicht löslichen und leicht zersetzlichem Traubenzucker übergeführt. Wenn dieser in den allgemeinen Kreislauf gelangte, so würde er, ohne für den Organismus verwertet zu werden, im Harne wieder ausgeschieden. Damit dies nicht geschieht und im Falle der Not dieser wichtige kraftliefernde Stoff in größeren Mengen bereit ist, wird er in der Leber in eine weniger leicht zersetzliche und feste Form übergeführt, in ihr mobilisiert und als Glykogen abgelagert. Aus den Untersuchungen von Claude Bernard, Pavy, Seegen, v. Mering geht hervor, daß das Pfortaderblut mehr Traubenzucker enthält als das Lebervenenblut, daß also der Traubenzucker in der Leber zurückgehalten wird, und die Leber die Fähigkeit hat, aus dem Traubenzucker, dem Monosaccharid, ein Polysaccharid, das Glykogen, zu bilden. Ob auch die übrigen Organe in der Lage sind, aus Glykose Glykogen zu bilden, ist bis jetzt noch nicht sicher entschieden. Es liegen eine Reihe von älteren Untersuchungen von Külz, Naunyn und anderen vor, die beweisen sollten, daß auch die Muskeln in der Lage sind, aus Traubenzucker Glykogen zu bilden. Aber die beobachteten Unterschiede sind so klein und so schwankend, daß ein bindender Schluß aus diesen Ergebnissen nicht gezogen werden kann. Neuerdings ist eine Arbeit von F. de Filippi erschienen, der Hunde mit Eckscher Fistel, bei denen die Leber durch direkte Verbindung der Pfortader mit der unteren Hohlvene aus dem Kreislauf ausgeschaltet ist, mit großen Mengen von Kohlehydraten fütterte und feststellen konnte, daß in diesem Falle die Muskeln dieselben großen Mengen von Glykogen (3,64, 4,28, 4,71 %) enthielten, wie man sie sonst nur bei maximalster Glykogenmästung beobachtet, während die Leber sich sowohl in bezug auf ihr relatives Gewicht, als auch in bezug auf ihren Glykogengehalt in einem Zustande befand, wie man sie sonst nur bei Inanition beobachtet. Er schließt daraus, daß unter diesen Verhältnissen die Muskeln selbst das Glykogen aus dem ihnen zugeführten Zucker gebildet haben. Daß aus seinen Versuchen und theoretischen Auseinandersetzungen zu schließen ist, auch unter normalen Verhältnissen seien die Muskeln und auch die übrigen Organe in der Lage, Glykogen zu bilden, ist nicht ausgeschlossen.

4b) Chemische Eigenschaften des Glykogens. Das Glykogen ist im Jahre 1855 von Claude Bernard in der Leber entdeckt und seine Haupteigenschaften beschrieben. Das Glykogen $(C_6H_{10}O_5)_n$ ist ein weißes, geruch- und geschmackloses Pulver. Sein Molekulargewicht ist nicht sicher festgestellt; jedenfalls widersprechen sich die Angaben über die Größe desselben sehr. Das Glykogen quillt in Wasser und löst sich scheinbar auf. Die Lösung zeigt deutliche Opaleszenz. Es handelt sich wahrscheinlich um eine kolloidale Lösung. Das Glykogen dreht nach rechts, $\alpha_D = 196,57$. Mit Jod

färbt es sich braunrot bis violettrot. Beim Erhitzen verschwindet die Farbe und tritt beim Erkalten wieder auf. Von Alkohol wird es aus seiner wässerigen Lösung gefällt.

Kupferoxydhydrat wird zwar in Lösung gehalten, aber nicht reduziert.

Durch Erhitzen mit verdünnter Säure wird es in Traubenzucker verwandelt; ebenso durch Einwirkung diastatischer Fermente. Der quantitative Nachweis (nach Pflüger) des Glykogens in den Organen beruht auf der Eigenschaft, durch Erhitzen mit konzentrierter Kalilauge nicht angegriffen zu werden, während das Organ selbst in Lösung geht. Aus der Lösung wird es durch Alkohol gefällt und nach Reinigung polarimetrisch bestimmt, oder mit Salzsäure invertiert und aus dem entstandenen, gravimetrisch oder titrimetrisch bestimmten Zucker das Glykogen berechnet.

4c) Menge des Glykogens in der Leber. Die Menge des Glykogens ist schwankend und im weitesten Maße von dem Ernährungszustand des Tieres abhängig. Die höchste bisher beobachtete Glykogenmenge in der Leber hat Mangold bei Fröschen gefunden, die im Monat Oktober in der Nähe von Greifswald gefangen wurden, und zwar 20,16 %. Sonstige maximale Werte sind bei Mästung beobachtet worden:

Hund	18,7 %	(Schöndorff)
Kaninchen	16,8 ,,	(Otto)
Huhn	15,3 ,,	(Otto)
Gans	10,5 ,,	(E. Voit)

Beim Hungern nimmt das Glykogen verhältnismäßig sehr schnell ab, verschwindet aber niemals vollständig aus der Leber. Dies muß aufs ausdrücklichste betont werden gegenüber der immer wiederkehrenden Behauptung, die oft zu den größten Irrtümern Veranlassung gab, daß durch Hunger das Glykogen nach wenigen Tagen, mindestens nach Wochen aus der Leber verschwindet. Es liegen drei Beobachtungen von Pflüger vor über längerdauernde Hungerperioden von Hunden von 28, 70 und 73 Tagen. Die Lebern enthielten 4,8 %, 0,02 %, 1,2 % Glykogen. Es gibt nach den Untersuchungen von Pflüger und Junkersdorf nur eine Methode, um die Leber von Hunden unter 0,1 % d. h. praktisch glykogenfrei zu machen. 8 Tage Hungern, dann 3 Tage lang unter weiterem Hungern subkutane Phloridzineinspritzungen; 7 Stunden nach der letzten Phloridzineinspritzung enthält die Leber im Mittel aus einer großen Zahl von Versuchen nur noch 0,0567 %. Auch bei Neugeborenen ist die Leber glykogenhaltig. Cramer fand in derselben beim Menschen 1 bis 2,2 %, Butte solches bei neugeborenen Hunden und Hundeföten. Auch bei Föten vom Rind, Schwein, Schaf konnte Pflüger schon in der ersten Fötalperiode Glykogen in mehr oder weniger geringen Mengen nachweisen; ja, Külz konnte dies schon in der ersten Keimanlage des Hühnchens nach 60 stündiger Bebrütung feststellen. Der Einfluß der Jahreszeit auf den Glykogengehalt der Leber zeigt sich außer bei Kaninchen besonders bei Winterschläfern, Fröschen, Schnecken, die im Winter einen besonders hohen Gehalt an Glykogen erkennen lassen, während derselbe im Sommer bedeutend geringer ist.

4d) Der Ursprung des Glykogens. Die Frage nach den Muttersubstanzen des Glykogens ist eine der umstrittensten der experimentellen Physiologie gewesen. Es würde den Rahmen dieses Artikels überschreiten, alle Tatsachen anzuführen, welche für und gegen die Fähigkeit der Hauptnahrungsstoffe Kohlehydrate, Eiweiß, Fett, Glykogen zu bilden festgestellt worden sind; der sich interessierende Leser findet darüber Genaueres in E. Pflügers Monographie über das Glykogen Bonn 1905, dem Artikel Glykogen von Cremer in den Ergebnissen der Physiologie Bd. 1 S. 803 1903 und dem Artikel Leber in Nagels Handbuch der Physiologie Bd. 2 S. 425 und Oppenheimers Handbuch der Biochemie Bd. 3 Abt. 1 S. 150.

α) Synthese des Glykogens. Während an der Tatsache der Fähigkeit der Leberzellen, synthetisch Glykogen zu bilden, wohl kein Zweifel herrscht, sind wir über die Kräfte, die bei dieser Synthese wirksam sind, noch völlig im unklaren. Man könnte ja daran denken, daß Fermente dabei im Spiele sind. Diese Annahme bietet keine großen Schwierigkeiten mehr, da ja Synthesen durch die Wirkung von Fermenten neuerdings mehrfach nachgewiesen worden sind. So gelang es z. B. Hill, festzustellen, daß Glukose unter dem Einfluß von Maltase zum Teil in ein Disaccharid, ein Gemenge von Maltose und Revertose zurückgewandelt wird. Ferner wissen wir, daß Hefezellen in der Lage sind, unter dem Einfluß der Karbohydrasen der Hefe unlösliche Kohlehydrate, vielleicht Glykogen, auf synthetischem Wege zu bilden. Es wäre vielleicht in erster Linie an das diastatische Ferment der Leber zu denken, welches dann sowohl spaltend auf das Glykogen als auch aufbauend auf Monosaccharide wirken würde. Derartige reversible Fermentprozesse sind mehrfach experimentell nachgewiesen. Auch über die Natur der bei der Glykogenbildung sich abspielenden chemischen Prozesse besitzen wir keine begründete Vorstellung. Man hat sich bisher die Bildung so vorgestellt, daß mehrere Moleküle Traubenzucker unter Austritt von Wasser sich polymerisieren. Gegen

diese Theorie, Anhydridtheorie, hat man eingewendet, daß sie weder die Entstehung von Glykogen aus Eiweiß, Fett und anderen Nichtkohlehydraten, noch den Umstand erkläre, daß das Glykogen unabhängig von der spezifischen Drehung der zugeführten Kohlehydrate immer rechtsdrehend ist (Pflüger). Dieser Umstand bietet aber keine Schwierigkeiten mehr, seitdem man weiß, wie leicht die einzelnen Kohlehydrate ineinander übergehen.

Früher hatte man deshalb die sogenannte Ersparnistheorie aufgestellt, daß alles Glykogen aus Eiweiß entstehe, indem dies in eine stickstoffhaltige und stickstoffreie Komponente zerfalle und diese letztere in Glykogen umgewandelt würde. Der Einfluß der Kohlehydrate solle sich nur darin äußern, daß sie das Eiweiß und das aus ihm entstandene Glykogen sparen. Seitdem von Voit und seinen Schülern aber nachgewiesen ist, daß bei der Glykogenmästung mit Kohlehydraten viel mehr Glykogen entsteht, als aus dem zu gleicher Zeit zugeführten Eiweiß gebildet werden könne, ist diese Theorie vollständig verlassen.

β) Die Muttersubstanzen des Glykogens. Um nachzuweisen, ob aus einem Stoff Glykogen entstehen kann, hat man verschiedene Wege eingeschlagen.

Man macht ein Tier durch Hunger und Muskelarbeit möglichst glykogenfrei, füttert es dann mit dem betreffenden Stoffe mehr oder weniger lange Zeit und bestimmt darauf das Glykogen in der Leber, eventuell auch in dem übrigen Körper. Um einen Anhaltspunkt zu haben für die Glykogenmenge des Versuchstieres bei Beginn der Fütterung, benutzt man ein auf gleiche Weise vorbereitetes Kontrolltier, dessen Glykogengehalt dann als Anfangsglykogengehalt des Versuchstieres gilt. Bei höheren Tieren ist nun zu bemerken, daß die individuellen Unterschiede bei ihnen sehr groß sind. Die Benutzung von Kontrolltieren, in vielen Fällen ist nur ein Kontrolltier benutzt worden, darf deshalb unzweifelhaft nur mit einer sehr breiten Erfahrung begründet werden, welche individuelle Unterschiede nach Möglichkeit ausschließt und einen Einblick in die Größe der Schwankungen der Glykogenwerte ermöglicht. Deshalb haben Versuche mit niederen Tieren in vielen Fällen große Vorzüge, weil die Zahl der Individuen sich beliebig groß nehmen läßt und individuelle Unterschiede dann kaum ins Gewicht fallen.

Eine zweite Methode ist die der künstlichen Durchspülung einer überlebenden Leber unter Zusatz des zu prüfenden Stoffes, eine Methode, wie sie von Brodie und Grube angewandt wurde. Diese Methode hat zur Voraussetzung, daß das Glykogen gleichmäßig auf die Leber verteilt ist. Seitdem aber von Schöndorff und Grebe Versuche angegeben worden sind, daß wenigstens für die Schildkrötenleber diese Verteilung nicht so gleichmäßig stattfindet, wie sie von Grube angenommen wurde, bedarf es weiterer Versuche, um diese Methode zu einer sicheren zu machen und die Ergebnisse als beweisend anzusehen.

Auf eine ähnliche Weise hat E. de Meyer die Hundeleber zu Durchspülungsversuchen benutzt. Beim Hund läßt sich durch Injektion mit verschiedenen Farbstoffen nachweisen, daß das Endstück der Pfortader nur die beiden linken Lappen und den viereckigen Lappen versorgt, während der Anfangsteil derselben den rechten Lappen durchspült. Wenn man also das Endstück der Pfortader durch eine Ligatur von dem Anfangsteil trennt und in beide Kanülen einbindet, so läßt sich in den auf diese Weise getrennten Lappen eine vollständig gleiche Durchspülung erreichen. Durch Injektion von verschiedenen Farbstoffen hat sich auch herausgestellt, daß die beiden Durchspülungsflüssigkeiten sich nicht miteinander mischen. Durch die eine Kanüle wurde dann Lockesche Flüssigkeit allein und durch die andere Lockesche Flüssigkeit mit Dextrose durchgeleitet und festgestellt, daß der Lappen, durch welchen Dextrose durchgeleitet wurde, bedeutend mehr Glykogen enthält, als der andere, durch welchen Lockesche Flüssigkeit allein durchgeleitet war.

Eine dritte Methode ist die, ein Tier diabetisch zu machen und zu entscheiden, ob der zugeführte Nahrungsstoff zu einer Steigerung der Zuckerausscheidung führt oder nicht.

Vermittels dieser Methoden hat man nun zunächst mit Sicherheit die Bildung von Glykogen aus Kohlehydraten nachgewiesen, und zwar aus den Monosacchariden Glukose, Galaktose, Mannose und Lävulose. Auch aus Lävulose bildet sich, wie Pflüger nachgewiesen hat, ein rechtsdrehendes Glykogen.

Die Disaccharide und Polysaccharide werden im Darm in Dextrose gespalten und können natürlich wie Rohrzucker, Milchzucker, Stärke, Maltose, Dextrine, Inulin usw als Glykogenbildner angesehen werden.

Was die Pentosen betrifft, so ist bis jetzt eine Glykogenbildung weder aus Arabinose noch aus Xylose oder Rhamnose erwiesen.

Auch für die Alkohole oder die Säuren der Zuckerarten, z. B. Glukuronsäure, hat sich eine Glykogenbildung nicht feststellen lassen. Dagegen scheint eine Bildung von Glykogen aus Glyzerin möglich zu sein.

Eine lange und heiß umstrittene Frage ist die Glykogenbildung aus Eiweiß gewesen. Pflüger hat in seiner schon erwähnten

Monographie über das Glykogen eine kritische Besprechung sämtlicher in der Literatur vorliegenden Untersuchungen unternommen und ist dabei zu dem Schlusse gekommen, daß bisher kein Beweis vorliegt, daß aus kohlehydratfreiem Eiweiß Glykogen entsteht. Pflüger hat sich die letzten Jahre seines Lebens weiterhin mit dieser Frage beschäftigt und in seiner letzten, kurz vor seinem Tode publizierten Arbeit mit Junkersdorf diesen Beweis erbracht.

Was ein so kritisch veranlagter und gewissenhafter Naturforscher über die Förderung der Wissenschaften in solchen Streitfragen denkt, das mögen seine eigenen Worte zur Einleitung dieser Untersuchung sagen:

„Jeder gewissenhafte Forscher wird mir beipflichten, daß in verwickelten Gebieten die strengste Kritik allein den Fortschritt verbürgt. Ich habe deshalb bis jetzt diesem Gebote getreu bei Prüfung aller Tatsachen den Satz vertreten, daß ein Beweis für die Entstehung von Zucker oder Kohlehydrat aus Eiweiß nicht erbracht sei. In meinem Buche über Glykogen sagte ich aber doch S. 113: Ich kann diese Auffassung nicht für falsch erklären, sie ist noch nicht bewiesen. Erst jetzt ist durch unsere soeben mitgeteilten umfassenden Untersuchungen festgestellt, daß im tierischen Körper die Leber imstande ist, aus Eiweiß das Glykogen synthetisch aufzubauen. Rätselhaft in chemischer Beziehung bleibt aber diese Synthese."

Die Versuche wurden in der Art ausgeführt, daß Hunde auf die schon früher angegebene Art (Hunger und Phloridzin) glykogenfrei gemacht und dann längere Zeit mit gekochtem Kabliaufleisch, das nur Spuren von Glykogen enthielt, gefüttert wurden. Das Glykogen wurde in der Leber und den Muskeln bestimmt.

Während die Hunde vor der Fütterung im Mittel 0,056 % Glykogen in der Leber und 0,198 % in den Muskeln enthalten, zeigen sie nach länger dauernder Kabliaufütterung im Mittel 6,46 %, im Maximo 10 % in der Leber und in den Muskeln im Mittel 1 %, im Maximo 2,53 %. Dadurch, daß auch die Muskeln große Mengen von Glykogen bei der Eiweißmästung enthalten, wird bewiesen, daß die Steigerung des Leberglykogens nicht durch Einwanderung des Glykogens aus anderen Organen erklärt werden kann, sondern daß eine gewaltige Neubildung von Glykogen aus Eiweiß stattgefunden hat, weil die Muskeln einen sehr großen Teil der Körpermasse ausmachen und in den anderen Geweben nur sehr kleine Mengen von Glykogen vorkommen.

Während die Möglichkeit der Glykogenbildung aus Eiweiß jetzt in positivem Sinne entschieden ist, ist die Bildung von Glykogen aus Fett noch vollständig unsicher. Es steht fest, daß die Fette vor ihrer Resorption in mehr oder weniger großem Umfange in ihre Komponenten Glycerin und Fettsäure gespalten werden. In der Darmwand entstehen dann wieder Neutralfette. Ein kleiner Teil von freier Fettsäure und mithin auch von Glycerin bleibt übrig und dieselben kommen als solche in den Kreislauf. Glycerin entsteht ferner bei der Spaltung der Fette in den Geweben. Da nun die Bildung von Glykogen aus Glycerin durch verschiedene Versuche gestützt ist, so ist die Möglichkeit nicht ausgeschlossen, daß auf dem Wege über das Glycerin, das zunächst in Zucker umgewandelt wird, Glykogen entsteht. Diese Glykogenmenge kann aber nicht sehr groß sein, da der Glyceringehalt des Neutralfettes nur 11 % beträgt.

Die Entstehung von Glykogen aus Fettsäuren ist bisher nicht bewiesen.

Pflüger und Junkersdorf haben auch versucht, ob durch Zufuhr von Fett eine Glykogenanhäufung in der Leber zu erzielen sei. Die Versuche fielen vollständig negativ aus. Es stellte sich sogar heraus, daß die Leber an Glykogen ärmer war, als wenn gar keine Nahrung zugeführt worden wäre, so daß die Zufuhr von Fett zur glykogenfreien Leber geradezu die Bildung neuen Glykogens zu verhindern scheint.

Es ist schließlich noch eine Reihe von Stoffen zu besprechen, nach deren Zufuhr man eine Glykogenvermehrung in der Leber beobachtet hat, wie Harnstoff, Ammoniumkarbonat, Glykokoll, Asparagin, Narcoticis usw. Da bei diesen Untersuchungen das Glykogen meist nur in der Leber bestimmt ist, so ist die Möglichkeit der Wanderung aus anderen Organen nicht ausgeschlossen und andererseits sind die beobachteten Unterschiede und die Zahl der Versuche so klein, daß sie nicht beweisend sind.

4e) Der Abbau des Glykogens. *α*) Die Tätigkeit von Fermenten. Das Glykogen wird als Reservestoff in der Leber aufgestapelt, um im Falle des Bedürfnisses als Dextrose wieder im Stoffwechsel verwertet zu werden. Die Bedingungen der Verwandlung von Glykogen in Traubenzucker sind schon von Claude Bernard richtig erkannt und gleichzeitig ist von ihm festgestellt worden, daß es sich um einen fermentativen Prozeß durch ein Ferment, Diastase, handelt, welches Glykogen in Zucker verwandelt, und nicht um vitale Prozesse in der Leber.

Der entstandene Traubenzucker ist dann später durch Drehungsvermögen, Osazondarstellung, Gärfähigkeit, Reduktionsvermögen usw. identifiziert worden. Die Versuche von Claude Bernard sind von verschiedenen Seiten nachgeprüft und der fermen-

tative Charakter dieser Umwandlung des Glykogens in Zucker sichergestellt, wenn auch eine große Reihe von Forschern Cavazzani, Dastre, Paton sich dagegen aussprachen und den vitalen Charakter dieses Prozesses betonten.

E. Pick und neuerdings Wohlgemuth haben dann weitere Beweise dafür gebracht, daß die Wirkung der Leberamylase nicht an das Vorhandensein intakter Leberzellen gebunden ist. Pick entblutete die Leber durch Auswaschen, behandelte das zerkleinerte Gewebe mit Alkohol und extrahierte mit Fluornatriumlösung. Glykogenlösung, mit diesem Extrakt im Brutschrank behandelt, nahm in wenigen Stunden deutlich ab, nicht aber nach vorherigem Aufkochen. Da die Wirkung viel stärker war, als die des Blutes, konnte sie nicht durch den Blutgehalt der Organe bedingt sein. Wohlgemuth benutzte dieselbe Methode wie Buchner bei der Zymase der Hefe. Er bereitete sich aus der Leber von Hunden, die vom Blute durch Ausspülen aufs sorgfältigste befreit, zerkleinert, mit Quarzsand verrieben war, in der Buchnerschen Presse bei einem Druck von 100 bis 200 Atmosphären einen Leberpreßsaft. Mit diesem Preßsaft, bei dem das Vorhandensein lebender Zellen wohl vollständig ausgeschlossen war, konnte dann sehr deutliche und starke diastatische Wirkung auf Glykogenlösung nachgewiesen werden.

β) Der Einfluß des Nervensystems. Ebenso wie Claude Bernard das Glykogen aus der Leber zuerst dargestellt hat, gebührt ihm auch die Entdeckung, daß das Nervensystem einen bedeutenden Einfluß auf die Ueberführung des Glykogens in Zucker hat. Die erste, hierher gehörige Tatsache ist sein berühmter Zuckerstich. Wenn man bei einem Tiere den Boden der Rautengrube im vierten Ventrikel des Gehirns mittels eines Troikarts verletzt, so tritt bereits 1 bis 2 Stunden nachher Zucker im Harn auf unter gleichzeitiger Steigerung des Blutzuckergehalts über die Norm. Der Zuckerstich gelingt aber nur dann, wenn die Lebern der Tiere Glykogen enthalten. Haben die Tiere aber vorher gehungert und ist eine Glykogenverarmung eingetreten, so versagt der Zuckerstich (Bernard, Dock, Naunyn). In welchem Zusammenhang steht nun die Verletzung der Medulla oblongata mit der Zuckerausscheidung im Harn? Auch dies ist im wesentlichen durch Claude Bernard aufgeklärt worden. Er wies zunächst nach, daß nach Durchschneidung der Vagi der Zuckerstich wirksam blieb, daß also der Weg vom Zuckerzentrum zum Körper nicht über die Nervi vagi geht. Wenn man den peripheren Stumpf reizt, bleibt die Glykosurie aus, reizt man aber den zentralen Stumpf, der noch mit der Medulla oblongata in Verbindung steht, so tritt Glykosurie auf. Ferner wies er nach, daß die Durchschneidung der Vagi am Halse die Leber zuckerfrei macht. Daraus folgert er, daß das Zuckerzentrum in der Medulla oblongata unter einer dauernden Erregung durch die Vagi stehe und dadurch die Zuckerbildung in der Leber veranlasse. Er faßt die Wirkung der Vagusreizung als einen reflektorischen Vorgang auf und glaubt, daß die Lungenäste des Vagus die auf das Zuckerzentrum wirkenden Fasern enthalten. Wenn er nämlich die Nervi vagi über der Leber und unter der Lunge durchschnitt, so blieb der Reiz ohne Wirkung. Durch Durchschneidungsversuche durch das Rückenmark konnte er ferner feststellen, daß die leitenden Bahnen im oberen Teile des Rückenmarks liegen, denn die Durchschneidung des Rückenmarks unter dem ersten Dorsalwirbel hebt die Wirkung des Diabeteszentrums auf.

Die Versuche von Claude Bernard sind dann von Eckhard bestätigt und erweitert worden. Er konnte nachweisen, daß nach Durchschneidung der Nervi vagi und sympathici am Halse der Zuckerstich wirksam bleibt, die Durchschneidung der Splanchnici ihn dagegen unwirksam macht. Es geht aus diesen Versuchen hervor, daß der Zuckerstich ausschließlich auf den Glykogenvorrat der Leber wirkt, und zwar auf dem Wege der Nervi splanchnici, und daß die Glykogenmassen, welche der Leber nicht angehören, beim Zuckerstich unbeteiligt bleiben.

Dies wird ferner durch Versuche von Moos, der zeigen konnte, daß nach Unterbindung der Lebergefäße der Zuckerstich unwirksam blieb, und durch die Versuche von Schiff, welcher bewies, daß bei Fröschen die Wirkung des Zuckerstichs aufhörte, sobald er die Lebergefäße und den Gallengang unterband, aufs sicherste erwiesen. Neuere Untersuchungen haben dann ergeben, daß auch die Nebennieren in naher Beziehung zu diesem Abbau des Glykogens stehen, indem nach doppelseitiger Nebennierenexstirpation die Zuckerstichglykosurie ausbleibt, während die Ansichten über die Ursachen dieses Ausbleibens der Zuckerstichglykosurie bei den verschiedenen Tierarten noch vollkommen variieren.

Claude Bernard stellt sich den Mechanismus der Erzeugung von Zucker in einer Steigerung der Blutzirkulation des Organs vor, wodurch eine Zunahme der Zuckerbildung verursacht werde. Pflüger hält aber auf Grund der Versuche von Heidenhain über die Innervation der Speicheldrüsen es für wahrscheinlicher, daß in der Bahn der Splanchnici nicht bloß Gefäßnerven, sondern auch sekretorische Nerven verlaufen, die

die Zuckerbildung in der Leber anzureizen vermögen. „Die letztere ist bedingt durch die Einwirkung des diastatischen Ferments. Also vermittelt der auf die Zellsubstanz wirkende Nerv, da alle Innervation Spaltung von Molekülen bewirkt, die Entstehung des Ferments, welches ein Zersetzungsprodukt des Protoplasmas ist.“

Diese Vorstellung macht es verständlich, daß von den verschiedensten Provinzen des Nervensystems Zuckerbildung der Leber angeregt werden kann, weil aus allen Teilen des Organismus sich Erregungen nach der Medulla oblongata fortpflanzen können und daß auch in pathologischen Fällen Erkrankungen des Nervensystems Glykosurien vera lassen können.

Sie gibt vielleicht auch eine Erklärung für eine Reihe von Umständen, welche ein Verschwinden des Glykogens in der Leber veranlassen können. Dazu gehörte in erster Linie starke Muskelarbeit, Hunger, Strychninkrämpfe, wenn auch nach einer Mitteilung von Mangold selbst durch mehrere Tage dauernde Strychninkrämpfe bei Fröschen kein vollständiges Verschwinden des Glykogens verursacht wird. Dazu gehören vielleicht schon bei der Tötung eines Tieres auftretende Krämpfe. Einwirkung von Giften, Adrenalinwirkung, Fieber, Wärmestich, Unterbindung der Gallengänge, Asphyxie, Fesselung von Tieren, Abkühlung, Exstirpation von Drüsen, wie Schilddrüse, Speicheldrüsen, Pankreas, Nebennieren usw.

Daß der Abbau des Glykogens in der Leber über Traubenzucker geht, ist aus dem Vorhergesagten wohl als wahrscheinlich anzunehmen. Es fehlt uns aber ein exakter Einblick in die Art der Verbrennung des gebildeten Zuckers. Wir kennen zwar die Endprodukte, Kohlensäure und Wasser, und wissen, daß eine Oxydation stattfindet. Es bleibt aber unklar, über welche Produkte diese führt. Die Zerstörung des Zuckers ist nach den neueren Untersuchungen an das Vorhandensein eines glykolytisch wirkenden Ferments gebunden, das man außer im Blute auch in anderen Organen nachgewiesen hat. Es ist aber schwer zu unterscheiden, ob die Mitwirkung von Mikroorganismen in allen Fällen auszuschließen und ob auch im lebenden Gewebe der Abbau des Traubenzuckers auf diese Weise zu erklären ist. Die Annahme Stoklasas, daß es sich nicht um einen oxydativen Vorgang, sondern um einen anaeroben, daß es sich um eine alkoholische Gärung handele, ist von den Nachuntersuchern, welche sich bemühten, unter Zusatz von Asepticis jede Bakterienwirkung auszuschließen, nicht bestätigt worden.

5. Diabetes (Glykosurie). Im Anschluß an die glykogene Funktion der Leber sei noch eine kurze Uebersicht gegeben über die Erscheinungen, die man allgemein unter dem Namen Diabetes zusammenfaßt, d. h. über die Ausscheidungen von Zucker im Harn, wenigstens so weit sie direkt die Leber betreffen, und mit dem Kohlehydratstoffwechsel der Leber in Berührung stehen.

5a) Physiologische Glykosurie. Wir müssen hier zunächst die wichtige Tatsache konstatieren, daß das Blut stets etwas Zucker enthält, etwa 0,1 %, und daß dasselbe unter normalen Verhältnissen diesen Zuckergehalt konstant erhält. Weder steigt derselbe bei stark kohlehydrathaltiger Nahrung, noch sinkt er merklich beim Hunger. Erst wenn der Blutzuckergehalt über die Norm steigt, dann tritt Zucker in größeren Mengen in den Harn über. Aber auch unter normalen Verhältnissen werden geringe Mengen von Zucker im Harn ausgeschieden. Diese Tatsache der physiologischen Glykosurie ist neuerdings von Schöndorff durch eine umfangreiche Untersuchung an vielen Hunderten Harnen von Soldaten und Studenten mit Sicherheit festgestellt, und zwar schwanken die Mengen zwischen 0,01 bis 0,027 % bei gewöhnlicher Ernährung. Bei der ausnehmend kohlehydratreichen Nahrung der Soldaten, die im Mittel 727 g Kohlehydrat pro Tag enthält, konnte der Zuckerwert bis auf 0,1 % steigen. Bei den verschiedenen Individuen schwankt die Menge von Kohlehydraten in der Nahrung, die eine Ausscheidung von Zucker im Harn veranlaßten. Diese Assimilationsgrenze ist verschieden und läßt sich für jedes Individuum leicht feststellen. Man nennt diese Zuckerausscheidung alimentäre Glykosurie.

5b) Experimenteller Diabetes. Die verschiedenen Glykosurien lassen sich nun je nach dem Zuckergehalt des Blutes in zwei große Hauptgruppen einteilen: 1. in solche, bei denen der Zuckergehalt des Blutes normal ist, bei denen aber die Fähigkeit der Nieren, den Uebergang des Blutzuckers in den Harn zu verhindern, herabgesetzt oder aufgehoben ist; 2. in solche, bei denen ein abnorm hoher Zuckergehalt des Blutes, eine Hyperglykämie, besteht. Da nun der tierische Organismus das Bestreben hat, den Zuckergehalt seines Blutes konstant zu erhalten, so wird der überschüssige Zucker im Harn ausgeschieden.

α) Der Phloridzindiabetes. Zu der ersten Gruppe gehört vor allem der von v. Mering entdeckte Phloridzindiabetes. Wenn man Säugetieren, Vögeln, auch Fröschen Phloridzin, ein Glykosid, welches aus den Wurzeln verschiedener Obstbäume gewonnen wird, und bei seiner Hydrolyse in Phloretin und Dextrose gespalten wird, eingibt, so tritt schon nach kurzer Zeit Glykos-

urie auf. Sie dauert nur so lange, wie das Tier unter der Phloridzinwirkung steht und erlischt mehrere Stunden oder höchstens Tage nach der letzten Phloridzingabe. Das Phloridzin wird nach den neuesten Untersuchungen von Schüller als Phloridzin-Glukuronsäure im Harn wieder ausgeschieden.

Man nimmt heute fast allgemein an, daß der Angriffspunkt des Phloridzins die Niere ist, und zwar ist man auf Grund der verschiedensten Versuchsanordnungen zu diesem Schlusse gekommen. Zunächst hat Minkowski zeigen können, daß nach doppelseitiger Nierenexstirpation es keinen Phloridzindiabetes mehr gibt; d. h. es fehlt jede Veränderung des Blutzuckergehalts. Frank und Isaac machten dieselbe Beobachtung, ja, sie fanden sogar, daß der Blutzuckergehalt einer Probe, die drei Stunden nach der Injektion entnommen war, tiefer war, als in der im Augenblick der Injektion entnommene. Ferner hat Zuntz festgestellt, daß, wenn er in eine Nierenarterie allein Phloridzin einspritzte, die von dieser Arterie versorgte Niere früher Zucker ausschied als die andere Niere und in der ersten halben Stunde bedeutend mehr Zucker lieferte. Pavy, Brodie und Siau haben die Versuche von Zuntz bestätigt und haben dann weiter durch Durchblutungsversuche an der überlebenden phloridzinvergifteten Niere gefunden, daß diese Niere große Mengen von Zucker ausschied, die sich aber nicht aus der Abnahme des Zuckergehaltes des Blutes erklären ließen. Sie dachten deshalb daran, daß die vergifteten Nierenzellen befähigt sind, aus irgendeinem durch das Blut zugeführten Stoff Zucker abzuscheiden.

Durch eine große Reihe von Untersuchungen ist außerdem erwiesen, daß während der Phloridzinglykosurie der Blutzuckergehalt nicht nur nicht erhöht ist, sondern daß es sogar, besonders wenn man die Tiere gleichzeitig hungern läßt, zu abnorm niedrigen Werten des Blutzuckergehaltes, zu einer Art Hypoglykämie kommt (Frank und Isaac, Junkersdorf). Welches Organ gibt nun den Zucker beim Phloridzindiabetes her? Ist die Zuckerausscheidung bei dieser Diabetesform ebenfalls an die Glykogenie der Leber gebunden? Schon bald nach der Entdeckung des Phloridzindiabetes haben v. Mering und Thiele Versuche unternommen, aus denen hervorging, daß auch bei entleberten Gänsen die Phloridzinvergiftung doch noch Zuckerausscheidung hervorrief. Ferner haben für den Hund Pavy, Brodie und Siau dieselbe Tatsache konstatiert, so daß also der Zucker auch aus anderen Quellen entstammen kann, als aus der Leber.

Neuerdings haben nun Frank und Isaac eine Methode gefunden, mit der man den Kohlehydratstoffwechsel der Leber ganz bedeutend schädigen kann, nämlich die Phosphorvergiftung. Sowohl bei schwacher wie auch bei starker Phosphorvergiftung zeigt sich besonders eine Hemmung der intermediären Kohlehydratsynthese in der Leber, also eine Hemmung der Fähigkeit, aus anderen Stoffen wie aus Glykogen Zucker zu bilden.

Sie haben nun an phosphorvergifteten Tieren zeigen können, daß trotz der progressiven Schädigung, die das Kohlehydratsynthetisierungsvermögen der Leber erhalten hat, die phloridzinvergifteten hungernden Tiere noch enorme Mengen von Zucker ausschieden, daß also auch bei versagender Leber der Phloridzindiabetes noch fortbesteht. Dem Einwande, daß der Zucker dann aus dem Muskelglykogen stammen kann, widersprechen sie mit der Tatsache, daß nach den Untersuchungen Marums die Muskeln bei schwerem Phloridzindiabetes fast glykogenfrei geworden sind und trotzdem noch Zucker ausgeschieden wird. Aus einer Reihe von Gründen, deren Erörterung zu weit gehen würde, nehmen sie deshalb an, daß, wenn die Leber ausgeschaltet ist, die Niere den Kohlehydrataufbau besorgt und die Ursprungsstätte des während der Phloridzinvergiftung auftretenden Zuckers ist. Auf Grund ihrer Experimente und theoretischen Auseinandersetzungen machen sie sich nun folgende Vorstellung über diese Zuckerbildung.

Die Niere vermag den Traubenzucker, der ihr mit dem Blute zuströmt, nicht mehr für ihren eigenen Stoffwechsel zu verwerten, weil sie ihn nicht mehr zum integrierenden Bestandteile ihres Protoplasmas machen kann, deswegen wird sie für Traubenzucker durchgängig und sucht durch immer erneute Produktion den Verlust immer wieder auszugleichen.

β) Adrenalindiabetes und Salzglykosurie. Einer vermehrten Permeabilität der Nieren schiebt man auch die Ursache der von Bock und Hofmann entdeckten und dann von Martin Fischer, Mac Callum, Underhill und Closson näher erforschten Salzglykosurie zu, die entsteht, wenn man größere Mengen von Kochsalzlösung in die Blutbahn bringt.

Die übrigen Formen des experimentellen Diabetes rühren nach den heutigen Kenntnissen von einer Hyperglykämie, einem vermehrten Traubenzuckergehalt des Blutes her. Hier sind zunächst alle die Einwirkungen zu erwähnen, die wir schon bei der Besprechung des Abbaues des Glykogens in der Leber kennen gelernt haben und die eine bedeutende und schnelle Umwandlung des Glykogens in

Zucker und eine Ueberschwemmung des Blutes mit Zucker veranlassen. Zu dieser Gruppe gehören die Adrenalinglykosurie, die Zuckerstichglykosurie, die Glykosurien, die auf Alterationen des Nervensystems beruhen, die Glykosurien nach Vergiftungen, nach Dyspnoe, nach Sauerstoffmangel usw.

γ) Der Pankreasdiabetes. Ferner gehört hierzu der von v. Mering und Minkowski entdeckte Pankreasdiabetes, d. h. die Tatsache, daß bei Hunden nach vollständiger Exstirpation der Bauchspeicheldrüse, des Pankreas, eine sehr starke und bis zum Tode dauernde Zuckerausscheidung im Harn auftritt. Dieselben Erscheinungen hat man auch bei Fröschen, Vögeln und Selachiern beobachtet. Die Glykosurie tritt aber nicht ein oder hört nach ganz kurzer Zeit wieder auf, wenn ein mehr oder minder großes Stück des Pankreas zurückbleibt, oder unter die Haut eingeheilt wird, aber so, daß es mit seinen Blut- und Lymphbahnen und Nerven in Zusammenhang mit dem Mesenterium bleibt. Erst wenn dies Stück, nachdem die Wunde vollständig verheilt war, auch exstirpiert wurde, trat Diabetes auf. Das Ergebnis weiterer Experimente, die nach der Entdeckung des Pankreasdiabetes die Erforschung der Ursache der Hyperglykämie und der daraus folgenden Glykosurie zum Zweck hatten, läßt sich kurz dahin zusammenfassen, daß der Pankreasdiabetes eine Störung der Regulation des Zuckerumsatzes vorstellt und daß normalerweise das Pankreas an die Blutbahn einen Stoff abgibt, der den Kohlehydratstoffwechsel regelt; daß die Pankreasdrüse also außer der Sekretion von Verdauungsfermenten noch eine innere Sekretion hat.

Im Jahre 1904 hat nun Pflüger von neuem die Frage der Ursache des Pankreasdiabetes aufgerollt. Wir hatten oben gesehen, daß der Diabetes ausbleibt, wenn man ein Stück Pankreas, das mit dem Mesenterium in Verbindung blieb, unter der Haut einheilte, daß er dagegen sofort auftrat, sobald man auch dieses Stück exstirpierte. Pflüger behauptet nun, daß die Durchschneidung der Nerven im Mesenterialstiel die Ursache des jetzt auftretenden Diabetes sei. Durch eine Reihe von Experimenten an Fröschen, denen er das Duodenum exstirpierte, das zwischen Pankreas und Duodenum gelegene Mesenterium durchschnitt oder nur die Nerven unter Erhaltung der Blutgefäße quetschte usw., konnte er immer einen Diabetes, den Duodenaldiabetes, erhalten. Der Nachweis dieser Beziehung des Duodenums zum Diabetes ist bis jetzt nur bei Fröschen gelungen. Die Versuche, an Hunden einen Duodenaldiabetes hervorzurufen, sind bis jetzt negativ geblieben; dies schließt aber nicht aus, daß er doch vorhanden ist.

Pflüger hatte sich auf Grund der Ergebnisse seiner Experimente folgende Anschauung über den Pankreasdiabetes gebildet. Der Zuckerhaushalt im tierischen Organismus ist zwei antagonistischen Kräften untergeordnet. Die eine Kraft vermag den Zuckergehalt des Blutes zu steigern. Sie ist eine Funktion des Nervensystems und hat ihren Sitz im Zuckerzentrum in der Medulla oblongata. Dieses Zentrum wird durch zentripetale Nervenfasern, je nach dem Bedürfnisse, in verschiedenem Grade erregt. Dieser der Bildung von Zucker dienenden Kraft steht nun eine antagonistische oder antidiabetische Kraft entgegen. Sie verhindert auf unbekannte Weise das Anwachsen des Zuckergehalts der Säfte und wird durch vom Duodenum ausgehende Nervenfasern vermittelt. Mit dieser Annahme, daß der ganze Kohlehydratstoffwechsel unter dem direkten Einfluß des Nervensystems steht, hat Pflüger die Theorie einer inneren Sekretion der Pankreasdrüse bei der Regulierung des Kohlehydratstoffwechsels nicht geleugnet, er hat sie nur nicht für bewiesen und seine Hypothese für besser begründet gehalten. Nun sind kürzlich Untersuchungen von Zuelzer, Dohrn und Marxer bekannt geworden, die, falls sie bestätigt würden, eine große Stütze für die Theorie der inneren Sekretion des Pankreas bilden würden. Sie haben aus dem Pankreas in einer nicht angegebenen Weise ein Präparat dargestellt, welches sowohl bei Hunden wie Menschen innerlich gegeben eine Herabsetzung der Zuckerausscheidung zur Folge hatte.

Ferner hat de Meyer Versuche angegeben zur Darstellung eines antipankreatischen Serums, welches sowohl auf die glykolytische Macht der Leber als auch die Hyperglykämie und die Zuckerausscheidung vermindernd einwirkt.

Man würde dann zu einer Vorstellung des Pankreasdiabetes kommen, die annimmt, daß das Pankreas mit Hilfe seines inneren Sekretes die Zuckerbildung in der Leber hemme und diese hemmende Aktion durch die Beeinflussung nervöser Apparate zustande komme. Der Wegfall der Pankreastätigkeit würde die normalen Hemmungen der Zuckerbildung entfernen. Dadurch kommt es zu einer Ausschüttung des vorhandenen Glykogens, zu einem raschen Abbau des aus den Kohlehydraten der Nahrung stammenden oder aus anderen Stoffen gebildeten Glykogens, damit zur Hyperglykämie und Glykosurie.

5c) Diabetes mellitus (Zuckerharnruhr). An diese verschiedenen Formen des experimentellen Diabetes schließt sich eine Form des Diabetes an, die bei Menschen und Tieren als besondere Krankheit vorkommt und Diabetes mellitus oder

Zuckerharnruhr genannt wird. Als Ursache der Zuckerausscheidung ist auch in diesem Falle eine sehr starke Hyperglykämie erkannt worden, die aber auch nur ein Symptom ist und recht verschiedene Ursachen haben kann. Man nimmt heute wohl allgemein an, daß der Diabetes mellitus keine einheitliche Krankheit ist, sondern durch die verschiedenartigsten pathologischen Momente bedingt sein kann. Man hat selbstverständlich, nachdem der experimentelle Pankreasdiabetes entdeckt war, sich gefragt, ob nicht der Diabetes mellitus in Beziehung zur Pankreasfunktion zu setzen sei. Man hat auch wiederholt Erkrankung der Pankreasdrüse beim Diabetes, besonders Degenerationen der Langerhansschen Inseln gefunden. Aber ebenso oft waren bei den schwersten Diabetesfällen ganz normale Verhältnisse in der Pankreasdrüse, so daß wir vorläufig eine sichere Angabe über die Beziehung des Pankreas zum Diabetes mellitus nicht geben können. Es gibt leichtere Fälle, wo Zucker im Harn nur erscheint, wenn Kohlehydrate in der Nahrung gegeben werden; bei Ernährung mit Fleisch, Fett oder bei starker Arbeit hört die Glykosurie auf. Diese Fälle faßt man als durch eine Schwächung der Leberfunktionen bedingt auf, in dem die Leber nicht mehr imstande ist, den ihr zugeführten Zucker rasch zu Glykogen zu verarbeiten; der Zucker tritt in den allgemeinen Kreislauf über und veranlaßt dann Glykosurie.

In anderen Fällen werden auch, wenn keine Kohlehydrate, sondern nur Fleisch und Fett gegeben werden, ja sogar beim Hunger ständig große Mengen von Zucker im Harn ausgeschieden. Für diese Fälle ist man veranlaßt anzunehmen, daß der normalerweise gebildete Zucker nicht mehr in genügender Weise verwertet oder verbrannt werden kann; denn ganz aufgehört hat die Funktion der Leber, Zucker zu verwerten und Glykogen zu bilden, nicht, man hat wiederholt noch mehr oder minder große Mengen von Glykogen in der Leber bei Diabetischen nachgewiesen.

Es fragt sich nun, ob die dem Diabetiker mangelnde Fähigkeit, den Zucker zu verbrennen, durch ein vermindertes Oxydationsvermögen bedingt sei.

Es hat sich aber herausgestellt, daß dies nicht der Fall ist. Schon Schultzen, Nencki und Sieber haben feststellen können, daß die Oxydationstätigkeit des Diabetikers nicht herabgesetzt ist. Respirationsversuche haben ferner ergeben, daß der Sauerstoffverbrauch bei Gesunden und Kranken von gleichem Körpergewicht und gleicher Ernährung dieselbe ist. Außerdem werden Eiweiß und Fett in derselben Weise wie bei Gesunden oxydiert. Nun hat neuerdings Baumgarten an Diabetiker oder pankreasdiabetische Hunde Stoffe verfüttert, welche durch ihre Aldehydnatur dem Zucker nahestehen, oder als Abbau- oder Oxydationsprodukte des Zuckers aufzufassen sind, wie Glykuronsäure, d-Glukonsäure, d-Zuckersäure, Glukosamin, Schleimsäure, Bernsteinsäure, Weinsäure usw; und es ergab sich, daß dieselben von Diabetikern ebenso glatt verbrannt wurden, wie von Gesunden.

5d) Herkunft des Zuckers. Wir haben bisher bei der Besprechung der verschiedenen Diabetesformen unerörtert gelassen, aus welchen Quellen der beim Diabetes im Harn ausgeschiedene Zucker, der beim Diabetes mellitus bis zu 1200 g (Naunyn) betragen kann, stammt. In erster Linie stammt natürlich der Zucker aus den Kohlehydraten der Nahrung oder dem Kohlehydratvorrate des Körpers. Es fragt sich aber, ob, wenn in der Nahrung keine Kohlehydrate sind oder der Kohlehydratvorrat des Körpers erschöpft ist, der Organismus aus anderen Stoffen, Eiweiß oder Fett, Zucker zu bilden vermag. Diese Frage ist sowohl von Lüthje wie von Pflüger in bejahendem Sinne beantwortet worden. Sie haben nämlich gefunden, daß pankreasdiabetische Hunde bei kohlehydratfreier Eiweißnahrung so große Zuckermengen ausscheiden, daß sie nicht mehr aus dem Glykogengehalt des Körpers und anderen kohlehydratliefernden Stoffen abgeleitet werden können. Es mußte also entweder das Eiweiß oder das Fett die zuckerliefernde Quelle sein. Der Streit ist bis jetzt noch nicht entschieden. Für die Bildung aus Eiweiß sprechen Versuche von Embden, der nach Fütterung von Aminosäuren bei pankreasdiabetischen Hunden eine Steigerung der Zuckerausscheidung fand, spricht ferner das Verhalten des Quotienten $\frac{D}{N}$, d. h. das Verhältnis des ausgeschiedenen Zuckers zum ausgeschiedenem Harnstickstoff. Die Größe desselben soll konstant sein, nämlich 2,8, und mit steigender Zuckerausscheidung soll die Ausscheidung des Stickstoffs zunehmen. Aber es haben sich doch größere Schwankungen gezeigt, Werte bis zu 14,6, die es wahrscheinlich machen, daß es nicht allein das Eiweiß ist, welches Zucker liefert, sondern daß auch das Fett bei der Zuckerbildung heranzuziehen ist. Dafür sprechen außer älteren Versuchen auch noch neuere Versuche von Junkersdorf, der bei phloridzinvergifteten Hunden sowohl bei glykogenfreien wie bei Hunden mit Fettnahrung Werte von $\frac{D}{N}$ fand, die so hoch waren, daß der Kohlenstoff des Eiweißes nicht allein ausreichte. den ausgeschiedenen Zucker zu bilden, mithin, da die Hunde

glykogenfrei waren, das Fett für die Zuckerbildung mit in Betracht zu ziehen war, um überhaupt eine Erklärung für die hohen Werte zu erhalten. Wir können also das Ergebnis aller bisherigen Versuche dahin präzisieren, daß außer den Kohlehydraten sowohl das Eiweiß wie das Fett in Betracht kommen kann. Einen Einblick in die komplizierten chemischen Vorgänge, welche bei der Bildung des Zuckers aus Eiweiß oder seinen Zersetzungsprodukten, z. B. den Aminosäuren, in Betracht kommen, besitzen wir ebensowenig, wie eine Vorstellung über die chemischen Prozesse, welche bei der Bildung von Zucker aus Fett oder den Spaltungsprodukten desselben, den Fettsäuren und dem Glycerin, eine Rolle spielen.

6. Die Beziehung der Leber zum Eiweißstoffwechsel. 6a) Auf- und Abbau von Eiweiß in der Leber. Nach den heutigen Anschauungen nimmt man an, daß die Eiweißkörper der Nahrung im Darm abgebaut werden, vielleicht ausschließlich zu Aminosäuren, dann diese Abbauprodukte resorbiert und von den Zellen der Darmwand aufgenommen und zurückgehalten werden. In diesen Zellen werden dann die einzelnen Bausteine in ganz bestimmter Weise wieder zu Eiweiß zusammengefügt. Dieses Eiweißgemisch wird dann an das Blut abgegeben und den einzelnen Körperzellen zugeführt.

Man hatte aber auch daran gedacht, und diese Möglichkeit war a priori nicht auszuschließen, ob der Aufbau von Körpereiweiß aus den resorbierten Spaltungsprodukten sich nicht in der Leber vollziehe. Diese Frage ließ sich aber durch eine Versuchsanordnung entscheiden, in der man die Leber aus dem allgemeinen Kreislauf ausschaltete. Wir haben schon früher gesehen, daß man die Pfortader direkt in die untere Hohlvene einnähen kann (Ecksche Fistel). Das aus dem Darm kommende Blut durchströmt dann nicht erst die Leber, sondern gelangt direkt in den allgemeinen Kreislauf. Abderhalden, Funk und London haben mittels dieser Methode Hunde einmal mit Fleisch, dann mit Eiereiweiß und drittens mit Gliadin, einem Eiweißstoff, der sich im Samen von Getreide findet, gefüttert. Nach einiger Zeit wurden die Tiere entblutet und das Blut auf Eiweißabbauprodukte untersucht. Es konnten weder Peptone noch Aminosäuren gefunden werden. Auch wurden die Plasmaeiweißkörper und die der roten Blutkörperchen auf ihren Gehalt an Glutaminsäure untersucht. Aber auch hier konnte kein Unterschied in den Eiweißkörpern trotz der Ernährung mit verschiedenem Eiweiß festgestellt werden.

Abderhalden und London haben diese Versuche noch erweitert, und es ist ihnen gelungen, einen Hund mit Eckscher Fistel ausschließlich mit tief abgebautem Eiweiß zu ernähren und nicht nur das Eiweißbedürfnis desselben zu decken, sondern sogar Stickstoffansatz zu erzielen. Es geht also aus diesen Versuchen das eine hervor, daß die Leber bei der Umwandlung von Nahrungseiweiß in Körpereiweiß keine unersetzliche Rolle spielt.

Ebensowenig wie man mit Sicherheit der Leber einen Anteil an dem Aufbau der Eiweißkörper zuschreiben kann, ebenso unsicher ist die Annahme, daß in der Leber normalerweise intra vitam ein Abbau der Eiweißkörper stattfindet. Man hat dies aus Beobachtungen geschlossen, die man bei der Autolyse der Leber gemacht hat. Man versteht darunter eine Selbstverdauung der Gewebe, die nach einiger Zeit eintritt, wenn Organe steril aufbewahrt werden. Man findet besonders bei der Autolyse der Leber weitgehende Spaltungsprodukte der Eiweißkörper durch proteolytische Fermente; außerdem treten desamidierende Prozesse auf, auch Peptide werden zerlegt durch Leberbrei. Besonders stark zeigen sich derartige Prozesse bei Phosphorvergiftung, bei akuter gelber Leberatrophie usw. Und es ist deshalb besonders von Jakoby die Ansicht vertreten worden, daß die normale Eiweißspaltung in den Organen unter dem Einfluß der Autolyse erfolgt. Auf jeden Fall muß man sich in der lebenden Zelle diesen Prozeß in viel langsamerem Tempo verlaufend denken, da die lebende Zelle sicher ihre Fermente nicht alle auf einmal in Aktion treten läßt, sondern daß hier ein fein abgestufter Regulationsmechanismus wirkt, der durch das Bedürfnis geleitet wird.

6b) Harnstoffbildung in der Leber. Die stickstoffhaltigen Zersetzungsprodukte, welche bei der Oxydation des Eiweißes entstehen, werden beim Menschen und dem Säugetier in der Hauptmenge in Form von Harnstoff im Harn ausgeschieden. Je nach der Art der Nahrung kann die Menge des Harnstoffs 70 bis 97 % des Gesamtstickstoffs im Harn betragen. Durch die grundlegenden Untersuchungen von v. Schröder ist festgestellt worden, daß die überlebende Leber aus Ammoniaksalzen Harnstoff bilden kann. v. Schröder leitete Blut durch die überlebende Leber eines Hundes unter Zusatz von verschiedenen Ammoniaksalzen und fand eine bedeutende Vermehrung des Harnstoffgehalts des Blutes nach der Durchblutung. Während die Durchblutung einer Hungerleber mit Hungerblut den Harnstoffgehalt unverändert ließ, erzielte er ebenfalls eine Harnstoffvermehrung des Blutes, wenn er das Blut eines in Verdauung befindlichen Hundes durch dessen Leber

leitete. Schöndorff hat diese Versuche in einer etwas modifizierten Form ausgeführt. Er leitete das Blut von Hungerhunden abwechselnd durch die Hinterbeine eines nach Fütterung mit Fleisch im höchsten Stadium der Verdauung getöteten Hundes und dann durch die Leber eines Hungerhundes. Bei der Durchleitung durch die Beine belud sich das Blut mit Stoffen der Eiweißzersetzung und bei jedesmaliger Durchleitung durch die Hungerleber konnte eine bedeutende Vermehrung des Harnstoffgehalts des Blutes konstatiert werden. Die Leber ist aber nicht der einzige Ort der Harnstoffbildung. Denn Versuche mit der Ausschaltung der Leber durch die Ecksche Fistel oder durch Leberexstirpation ergaben, daß auch trotz der dann ja auch nicht ganz vollständigen Ausschaltung des Leberkreislaufs, da die Leberarterie der Leber ja noch Blut zuführt, immer noch Harnstoff im Harn, wenn auch in vermindertem Maße, ausgeschieden wurde. Es gibt aber auch Fälle, wo trotz ausgedehnter Leberverödung eine mehr oder minder reichliche Harnstoffbildung stattfindet und bisweilen sogar keine oder wenigstens keine namhafte Aenderung in dem Verhältnis des Ammoniaks zum Gesamtstickstoff und Harnstoff im Harn zum Vorschein kommt.

Auch die Beobachtungen aus der menschlichen Pathologie, wo Erkrankungen der Leber zu einer starken Herabsetzung der Funktionen derselben führten, lieferten keinen eindeutigen Beweis, daß die Leber der einzige Ort ist, wo die Harnstoffbildung stattfindet. Aus fast allen Arbeiten geht mit einiger Sicherheit hervor, daß die Menge des ausgeschiedenen Harnstoffs selbst in schwersten Fällen von Lebercirrhose, akuter gelber Leberatrophie und Phosphorvergiftung völlig normal sein kann und daß per os zugeführte Ammoniaksalze noch zu Harnstoff verarbeitet werden können.

Es ist hier nicht der Ort, auf die verschiedenen Theorien einzugehen, die man sich über die Entstehung des Harnstoffs aus Eiweiß gebildet hat. Das Nähere darüber wird in dem Artikel „Harn" gegeben werden.

6c) Bildung der Harnsäure in der Leber. Während beim Menschen und den Säugetieren der Stickstoff zum weitaus größten Teil in Form von Harnstoff im Harn ausgeschieden wird, erscheint im Harn der Vögel und Reptilien der Stickstoff fast nur in Form von Harnsäure. Aber auch beim Menschen und beim Säugetier, sowohl beim Pflanzenfresser wie beim Fleischfresser, werden geringe Mengen von Harnsäure secerniert. Die Harnsäure, die nach den neueren Untersuchungen von Emil Fischer als ein 2, 6, 8-Trioxypurin aufgefaßt wird, stammt zum größten Teil aus den Purinkörpern, die in der Nahrung zugeführt werden, zum Teil aus den Nukleinsäuren der Zellen. Es ist dann besonders von Schittenhelm nachgewiesen worden, daß diese Harnsäurebildung wahrscheinlich enzymatischer Natur ist. Er konnte aus Leber und Milz das harnsäurebildende Ferment, das eine Oxydase ist, isolieren und feststellen, daß durch ein desamidierendes Ferment Adenin und Guanin in Hypoxanthin oder Xanthin umgewandelt werden und diese dann durch ein oxydierendes Ferment in Harnsäure. Es ist noch unentschieden, wie groß die Zahl der Fermente ist, die bei diesen Umwandlungen mit im Spiele sind, ob für jeden einzelnen Zwischenprozeß ein besonderes Ferment angenommen werden muß.

Wir können also für den Menschen eine besondere Beteiligung der Leber an der Bildung der Harnsäure nicht nachweisen, sondern müssen annehmen, daß die Harnsäure nicht synthetisch, sondern durch Spaltung aus den Nukleinsäuren entsteht. Denn die Versuche, eine synthetische Bildung der Harnsäure in der Leber zu beweisen, sind negativ ausgefallen oder ihre Ergebnisse widersprechen sich. Anders verhält es sich bei den Vögeln. Bei diesen verläßt der Stickstoff in Form von Harnsäure den Körper und steht in derselben Abhängigkeit zur Größe des Eiweißstoffwechsels, wie der Harnstoff bei Säugetieren. Durch Zufuhr von Ammoniaksalzen, Aminosäuren, Harnstoff wird die Harnsäurebildung vermehrt. Durch Exstirpation der Leber bei Gänsen konnte Minkowski zeigen, daß dann die Harnsäureproduktion fast vollständig ausblieb und der Stickstoff in Form von milchsaurem Ammoniak ausgeschieden wurde. Auch die Unterbindung der Lebergefäße hatte schon dieselbe Wirkung. Daß es sich wirklich um eine Synthese der Harnsäure aus Milchsäure und Ammoniak handelt, konnten Kowalewski und Salaskin feststellen, indem sie bei der Durchblutung der Gänseleber mit Ammoniumlaktat eine deutliche Harnsäurevermehrung erhielten. Ein Teil der Harnsäure wird aber auch bei den Vögeln nach den Versuchen von v. Mach auf oxydativem Wege gebildet.

6d) Bildung von Aetherschwefelsäuren. Im Darm finden außer der Spaltung der Nahrungsstoffe durch Fermente mehr oder minder starke Fäulnisprozesse unter dem Einfluß von Bakterien statt. Aus den Eiweißstoffen, und zwar aus dem aromatischen Bestandteile derselben entstehen nun eine Reihe von für den Organismus giftigen Produkten p-Kresol, Phenol, Indol und Skatol. Diese Stoffe werden nach den Untersuchungen von Baumann an Schwefelsäure, die durch Oxydation des Schwefels des Eiweißes entsteht, gepaart und

dadurch entgiftet und im Harne ausgeschieden. Schon Baumann suchte in seiner ersten Arbeit auch über die Lokalisation der Aetherschwefelsäurebildung im Organismus Aufklärung zu gewinnen. Er konnte feststellen, daß bei mit Phenol vergifteten Hunden in der Leber vorübergehend eine starke Anhäufung phenolbildender Substanz stattfindet. Weitere Versuche von Baumann selbst, dann Autolyseversuche von Kochs und Landi, Versuche von Massenga und Reale, Lang und anderen, widersprachen sich in ihren Ergebnissen bezüglich der Frage, ob die Leber ausschließlich der Ort für die Bildung der Aetherschwefelsäure sei. Erst durch die Untersuchungen von Embden und Gläßner ist in Durchblutungsversuchen nachgewiesen worden, daß diese Synthese sich in erster Linie in der Leber vollzieht, daß aber vielleicht Niere und Lunge, wenn auch nur in geringem Maße, daran beteiligt sind.

7. Das Verhalten der Leber bei Vergiftungen. Schon physiologisch hat die Leber die Aufgabe, wie die letzten Betrachtungen über die Beziehung derselben zum Eiweißstoffwechsel ergaben, für den Organismus giftige, im intermediären Stoffwechsel entstandene Produkte zu entgiften und unschädlich zu machen. Aber auch Gifte, die von außen zugeführt werden, können durch die Leber in ihrer Giftwirkung abgeschwächt werden. Es ist z. B. für die Alkaloide eine feststehende Tatsache, daß dieselben viel stärker toxisch wirken, wenn sie subkutan injiziert, als wenn sie per os verabreicht werden. Dies kommt nicht allein daher, daß sie von dem Darmepithel langsamer resorbiert werden, sondern daß sie nach ihrer Resorption durch die Pfortader der Leber zugeführt werden. Die Leberzellen häufen die Gifte in ihrem Protoplasma an, zerstören sie teils, teils führen sie dieselben durch die Galle in den Darm wieder aus. Dies ist für die verschiedensten Alkaloide, wie Nikotin, Strychnin, Morphium, Kokain usw nachgewiesen.

Auch mineralische Gifte, Salze der Schwermetalle, werden in der Leber zurückgehalten. Es gibt auch eine Reihe von Beobachtungen, welche dartun, daß Fermente (Emulsin), Farbstoffe, Methylviolett, Methylenblau in der Leber zurückgehalten und zum Teil verändert werden. Die Gifte werden aber nicht nur in der Leber zurückgehalten, sondern manche von ihnen rufen auch Veränderungen in der Leber hervor; die sich hauptsächlich in einer abnormen Verfettung derselben äußern. Man hat diese in besonders hohem Maße beobachtet bei Vergiftung mit Phosphor, Arsen, Antimon, Chloroform, Alkohol, Phloridzin usw. Man hat sich früher diese Verfettung als durch fettige Degeneration verursacht vorgestellt und als einen Beweis für die Entstehung von Fett aus Eiweiß angesehen. Durch die Versuche von Lebedeff, Rosenfeld und besonders Athanasiu ist aber nachgewiesen worden, daß es sich nicht um eine fettige Degeneration, sondern um Fettinfiltration handelt, indem Athanasiu an phosphorvergifteten Tieren zeigen konnte, daß der Gesamtfettgehalt der Tiere unverändert bleibt, obwohl die Leber stark an Fett zugenommen hatte.

8. Die Galle. 8a) Eigenschaften und Zusammensetzung der Galle. Die Galle ist ein Gemenge von dem Sekret der Leberzellen und dem der Drüsen der Gallengänge und der Schleimhaut der Gallenblase, welch letztere hauptsächlich Schleim absondern. Das Sekret der Leber ist dünnflüssig und klar, während die in der Blase angesammelte Galle infolge von Rückresorption von Wasser und Beimengung von Schleim zähe und dickflüssig und außerdem durch abgestoßene Epithelien, Pigmentkalk usw trübe erscheint.

Das spezifische Gewicht der Galle schwankt beim Menschen zwischen 1010 und 1040. Die Reaktion ist alkalisch auf Lackmus. Die Farbe ist bei den verschiedenen Tieren wechselnd vom goldgelben, gelb braunen, bronzegrünen bis zum grasgrünen oder blaugrünen Ton. Die Farbe der Menschengalle, wie man sie von Hingerichteten unmittelbar nach dem Tode erhält, ist gewöhnlich goldgelb, oder gelb mit einem Stich ins Bräunliche, manchmal auch grün.

Die Menschen- und Rindergalle schmeckt bitter mit einem süßlichen Nachgeschmack. Als spezifische Gallenbestandteile kommen in Betracht: die Gallensäuren, an Alkalien gebunden und die Gallenfarbstoffe. Außerdem noch Lezithin und Phosphatide, Cholesterin, Seifen, Neutralfette, Harnstoff, Spuren von Aetherschwefelsäuren, gepaarte Glukuronsäuren, Mineralstoffe usw.

Die Gallensäuren sind gepaarte Säuren, und zwar unterscheidet man Glykocholsäuren und Taurocholsäuren. Die Glykocholsäuren sind stickstoffhaltig, aber schwefelfrei und werden bei der hydrolytischen Spaltung in einen stickstoffhaltigen Bestandteil, das Glykokoll, und einen stickstofffreien, die Cholsäure oder Cholalsäure, gespalten. Die Taurocholsäuren sind stickstoff- und schwefelhaltig und werden bei der Hydrolyse in Taurin und Cholsäure zerlegt. In der menschlichen Galle ist hauptsächlich Glykocholsäure, weniger Taurocholsäure, enthalten. Beim Hunde findet sich fast ausschließlich Taurocholsäure.

Außer diesen beiden wichtigsten Gallensäuren hat man noch seltener vorkommende Gallensäuren in den Gallen verschiedener Tiere gefunden: Glykocholeinsäure und Taurocholeinsäure in der Rindergalle, Hypoglykocholsäure und Hypotaurocholsäure in der Schweinegalle, Chenotaurocholsäure in der Gänsegalle, Ursocholeinsäure in der Eisbärgalle. Die Gallensäuren werden mittels der Pettenkoferschen Reaktion nachgewiesen. Zu der Galle oder zu der Flüssigkeit, in der man Galle nachweisen will, nachdem dieselbe vorher enteiweißt ist, setzt man konzentrierte Schwefelsäure und ein paar Tropfen einer 10prozentigen Rohrzuckerlösung hinzu, dann entsteht eine schöne kirschrote bis rotviolette Flüssigkeit.

Die Gallenfarbstoffe sind sehr zahlreich. Die Mehrzahl der bekannten Farbstoffe kommt indessen nicht in der normalen Galle vor, sondern nur in der Leichengalle oder in den Gallensteinen.

Die wichtigsten physiologisch vorkommenden Gallenfarbstoffe sind das rotgelbe Bilirubin, das grüne Biliverdin, und zuweilen auch Urobilin.

Außerdem sind noch beobachtet worden Bilifuscin, Choleprasin, Biliprasin, Bilihumin, Bilicyanin und Choletelin. Das Bilirubin sieht man als einen Abkömmling des roten Blutfarbstoffes an, und zwar hat es dieselbe prozentische Zusammensetzung wie das Hämatoporphyrin. Beim Stehen an der Luft oxydiert sich eine Bilirubinlösung und verwandelt sich in grünen Farbstoff. Auf dieser Oxydationsfähigkeit des Bilirubins beruht der Nachweis der Gallenfarbstoffe durch die Gmelinsche Gallenfarbstoffreaktion. Ueberschichtet man in einem Reagenzglase Salpetersäure, welche etwas salpetrige Säure enthält, vorsichtig mit Galle, so erhält man an der Berührungsstelle der beiden Flüssigkeiten nacheinander eine Reihe von farbigen Schichten, und zwar von oben nach unten: grün, blau, violett, rot und rotgelb.

Die erste Oxydationsstufe ist das Biliverdin, dann folgt Bilicyanin und schließlich Choletelin.

Die übrigen schon oben erwähnten anderen Gallenbestandteile kommen nur in geringen Mengen vor und sind nicht charakteristisch für die Galle an sich.

Unter den Mineralstoffen sind außer dem Alkali, an das die Gallensäuren gebunden sind, dieselben Salze gefunden worden wie in anderen tierischen Flüssigkeiten. Auch Spuren von Kupfer und Zink scheinen vorzukommen, während das Eisen ein regelmäßiger, wenn auch in wechselnder Menge auftretender Bestandteil ist.

Die Zusammensetzung der menschlichen Galle ist schwankend. Die Menge der festen Bestandteile in der Lebergalle schwankt zwischen 16 und 35 pro Mille, während dieselbe in der Blasengalle bis zu 17% betragen kann. Die molekulare Konzentration ist trotz dieser Schwankungen in der Trockensubstanz ungefähr dieselbe wie die des Blutes (Brand) $\Delta = -0{,}54$ bis $-0{,}58$.

Als Beispiele für die Zusammensetzung der Galle seien hier Analysen von Hammarsten über Leber- und Blasengalle des Menschen angeführt:

	Lebergalle			Blasengalle
Feste Stoffe	2,52	3,526	2,54	16,02
Wasser	97,48	96,47	97,46	83,98
Mucin und Farbstoffe	0,529	0,429	0,515	4,438
Gallensaure Alkalien	0,931	1,824	0,904	8,723
Taurocholat	0,303	0,208	0,218	1,934
Glykocholat	0,628	1,616	0,686	6,789
Fettsäuren und Seifen	0,123	0,136	0,101	1,058
Cholesterin	0,063	0,16	0,15	0,87
Lezithin }	0,022	0,057	0,065	0,141
Fett }		0,096	0,061	0,150
Lösliche Salze	0,807	0,676	0,725	0,302
Unlösliche Salze	0,025	0,049	0,021	0,236

8b) Herkunft der einzelnen Gallenbestandteile. *a*) Gallensäuren. Als Ort der Bildung der Gallensäuren betrachtet man ausschließlich die Leber. Man hat bei Fröschen die Leber exstirpiert und hat in seinen Geweben keine Anhäufung von Gallensäuren feststellen können. Nach Unterbindung des Ductus choledochus bei Fröschen gelang es Koerber, diesen Nachweis zu führen. Auch beim Hunde läßt sich zeigen, daß die Bereitung der Gallensäuren eine Funktion der Leber ist. Wenn man bei einem Hunde den Ductus choledochus unterbindet, so finden sich in der aus dem Ductus thoracicus austretenden Lymphe Gallensäuren. Unterbindet man aber den

Ductus thoracicus, so finden sich keine wahrnehmbaren Spuren im Blut. Bei Verschluß der Gallenausführungsgänge findet also Stauung der Galle statt, Uebertreten in die Lymphe und dann in die Blutbahn.

Wenn die Gallensäuren auch in anderen Organen gebildet würden, so müßten bei derartigen Versuchen sich Gallensäuren im Blute und in den Organen ansammeln.

Bezüglich der Stoffe, aus welchen die Gallensäuren gebildet werden, müssen wir unterscheiden zwischen deren Paarlingen, dem Glykokoll und Taurin einerseits und der Cholsäure andererseits.

Das Glykokoll (Amidoessigsäure) ist uns als direktes Spaltungsprodukt der Eiweißkörper bekannt und das Taurin (Amidoäthylsulfonsäure) entsteht, wie wir durch die Untersuchungen von Friedemann wissen, aus dem Cystin, welches wieder vom Cystein stammt, das ein Zersetzuugsprodukt des Eiweißes ist. Daß aber auch in der Leber Cystin in Taurin übergeführt wird, konnten v. Bergmann und Wohlgemuth sicherstellen. Fütterten sie Tiere (Kaninchen, Hunde) mit Cystin allein oder gleichzeitig mit Cystin und cholsaurem Natrium, so erhielten sie eine starke Vermehrung der Taurocholsäure. Die Vermehrung an Taurocholsäure betrug etwa so viel, wie dem Schwefel des gefütterten Cystins entspricht.

Ueber die Herkunft der Cholsäure wissen wir nichts Näheres. Man hat die Cholsäure in Beziehung gebracht zu den Cholesterinen, weil diese in bezug auf Formel und Reaktionen der Cholsäure nahestehen sollen. Pflüger hat einmal bei der Besprechung der Arteigentümlichkeit der Eiweißstoffe für jede Tierart den Gedanken geäußert, er halte es auf Grund der Arteigentümlichkeit der Cholalsäure für in hohem Grade wahrscheinlich, daß diese ebenso wie das Glykokoll und das Taurin aus dem Gefüge des Eiweißmoleküls stamme.

β) Gallenfarbstoffe. Für die Bildung der Gallenfarbstoffe ist die Leber ebenfalls das Hauptorgan. Aber es sind doch eine Reihe von Beobachtungen bekannt, welche die Entstehung derselben auch in anderen Organen nahelegen. Man findet in alten Blutextravasaten einen Farbstoff, Hämatoidin, der mit dem Bilirubin identisch ist. Ferner ist von Latschenberger bei Pferden eine Entstehung von Gallenfarbstoff aus dem Blutfarbstoff in den Geweben beobachtet worden. Außerdem hat man in der Placenta Gallenfarbstoff nachgewiesen.

Aber für alle diese Farbstoffe ist jedenfalls die Leber das Ausscheidungsorgan, denn die Injektion von Bilirubin in das Blut hatte eine bedeutende Steigerung von Gallenfarbstoffen durch die Galle zur Folge, während im Harn nur Spuren waren. Die Mengen derartig gebildeter Gallenfarbstoffe sind aber nur gering. Die Hauptmenge wird jedenfalls in der Leber gebildet, dafür sprechen Versuche von Stern, der bei Tauben nach Unterbindung der Gallengänge allein schon nach fünf Stunden Gallenfarbstoffe im Blute nachweisen konnte. Unterband er die Gallengänge und zugleich alle Gefäße, die zur Leber führten, so fehlte im Blute und den Geweben jede Spur desselben. Ferner haben Minkowski und Naunyn gefunden, daß die Vergiftungen mit Arsenwasserstoff bei normalen Gänsen eine reichliche Bildung von Gallenfarbstoffen und eine Entfernung von stark gallehaltigem Harn zur Folge hatte, aber bei entleberten Gänsen ohne Wirkung blieb. Die Gallenfarbstoffe entstehen aus dem Blutfarbstoffe. Dafür spricht zunächst die Identität zwischen Hämatoidin und Bilirubin. Dafür sprechen Versuche von Küster, der aus Bilirubin dieselben Hämatinsäuren mit denselben Methoden darstellen konnte, wie aus Hämatin, einem Abkömmling des roten Blutfarbstoffes. Dafür spricht die Isomerie zwischen Bilirubin und Hämatoporphyrin, welches ebenfalls aus dem roten Blutfarbstoff stammt. Dafür sprechen endlich Versuche von Stadelmann, der bei einem Hunde nach Injektion von Hämoglobinlösungen in das Blut eine vermehrte Farbstoffausscheidung durch die Galle beobachten konnte.

8c) Die Sekretion der Galle. Durch die von Pawlow in so bedeutendem Maße verbesserte Technik der chirurgischen Operationen am Verdauungskanal, durch welche es ihm z. B. gelang, die Einmündungsstelle des Gallenausführungsganges in das Duodenum in die äußere Bauchhaut einzunähen, sind wir in der Lage normale Verhältnisse bei der Gallensekretion zu beobachten und die Abhängigkeit derselben von den verschiedensten Umständen festzustellen.

Was zunächst die Menge der sezernierten Galle beim Rinde betrifft, so schwanken die Angaben für die verschiedenen Individuen ganz bedeutend. Man hat Grenzwerte von 2,9 bis 36,4 g Galle pro kg Tier in 24 Stunden beobachtet. Für das Schaf werden nach Colin 330 g, für das Pferd 5000 bis 6000 g, für das Rind 2000 bis 5000 g pro 24 Stunden angegeben. Die Größe der Gallenabsonderung beim Menschen ist ebenfalls derartigen großen Schwankungen unterworfen. Man hat Mengen von 514 bis 1083 ccm pro 24 Stunden beobachtet. Die Sekretion der Galle erfolgt kontinuierlich. Sie findet schon während des intrauterinen Lebens statt und dauert auch im Winterschlaf fort. Beim Hunger nimmt die Sekretion ganz be-

deutend ab, dauert aber bis zum Hungertode an.

Nahrungsaufnahme steigert die Gallensekretion wieder bedeutend und zwar haben Untersuchungen von Heidenhain ergeben, daß die Kurve der Gallenproduktion zweimal, nach 3 bis 5 Stunden und nach 13 bis 15 Stunden nach der Nahrungsaufnahme ansteigt. Die verschiedenen Nahrungsstoffe sollen nun in verschiedener Weise ihren Einfluß auf die Gallensekretion äußern und zwar sollen besonders Fett und Eiweiß die Produktion von Galle steigern, während nach Zufuhr von Kohlehydraten die Sekretion viel geringer ist.

Ferner hat Barbeira gezeigt, daß eine nahe Beziehung zwischen der Gallenabsonderung und der Menge des gebildeten Harnstoffs besteht. Die Steigerung der Gallensekretion hängt davon ab, ob und wieviel Harnstoff gebildet wird. Die Ursache der nach Nahrungsaufnahme entstehenden Steigerung der Gallensekretion sei in der Veränderung zu suchen, die diese Nahrung in der Leber erleide und besonders in der Bildung des Harnstoffs. Die Galle ist nach ihm ein Produkt der Dissimilation, dessen Menge mit dem Grade, in welchem die Leber arbeitet, steigt und fällt.

Ein weiteres physiologisch wirkendes gallentreibendes Mittel ist die Galle selber und zwar der von Schiff beobachtete Anteil der Galle, der vom Darm wieder zur Resorption gelangt, und der Leber durch die Pfortader wieder zugeführt wird. Man hat förmlich von einem Kreislauf der Galle gesprochen und hat angenommen, daß beständig Gallenbestandteile resorbiert und wieder ausgeschieden werden. Man hat auch beobachtet, daß Einfuhr von Galle und gallensauren Salzen die Gallensekretion beschleunigt. Außerdem scheinen Säuren, besonders normalerweise die im oberen Teile des Darmes befindliche Salzsäure einen Reiz für die Gallenproduktion abzugeben. Dies haben Versuche von Fleig ergeben, der nach Injektion von Säure in das Duodenum und den oberen Teil des Jejunums eine starke Gallenproduktion beobachtete. Möglicherweise kann diese Säurewirkung und ebenso die Wirkung von in das Duodenum eingeführtem Chloralhydrat auf die Bildung von Sekretinen zurückgeführt werden.

Bezüglich des Einflusses von Nerven auf die Gallenproduktion kennen wir bisher nur eine Reihe von Beobachtungen, die dartun, daß diese Nerven nur vermittels ihrer Wirkung auf den Regulationsmechanismus des Gefäßtonus ihre Wirkung ausüben. Das Vorhandensein von eigentlichen Sekretionsnerven für die Galle ist bisher noch nicht bewiesen. Aber dies schließt nicht aus, daß es doch eigentliche Sekretionsnerven für die Leber gibt; hat man doch auch erst ganz vor kurzem die entsprechenden Nerven für die Magendrüsen und die Bauchspeicheldrüse in einwandfreier Weise nachweisen können, nachdem die geeigneten Versuchsbedingungen, besonders von der Pawlowschen Schule, gefunden waren.

δ) Die Bedeutung der Galle für die Verdauung. Ehe man genauer wußte, welche Bedeutung die Galle für die im Darm sich abspielenden Verdauungsprozesse hat, hatte man sich die verschiedensten Vorstellungen über ihre Funktion gemacht, die aber bei kritischen Nachuntersuchungen nicht aufrecht erhalten werden konnten. So hatte man der Galle stark antiseptische Eigenschaften zugeschrieben. Man hatte nämlich beobachtet, daß Tiere mit Gallenfisteln abnorme Fäulnisprozesse im Darm aufwiesen. Nun haben direkte Versuche mit Galle wohl nachgewiesen, daß sie hemmend auf gewisse Reaktionen wirkt, daß sie aber kein gutes Antiseptikum ist. Wurde ferner bei den Tieren mit Gallenfisteln das Fett möglichst in der Nahrung weggelassen, so zeigte sich keine stärkere Fäulnis im Darm als bei normalen Tieren. Es war also die mangelhafte Resorption von Fett, die die stärkere Fäulnis veranlaßte, weil dieses als besonders guter Nährboden für die Entwickelung der Fäulnisbakterien dient. Auch ein besonderer Einfluß auf die Darmperistaltik ist der Galle zugesprochen worden. Aber neuere Untersuchungen von Schupbach haben ergeben, daß bei diesem Einfluß wohl zu unterscheiden ist zwischen Dünndarm und Dickdarm. Auf die Bewegung des Dünndarms übt die Galle entweder gar keinen Einfluß aus oder einen ganz schwach hemmenden. Ja, in Versuchen am überlebenden Katzendarm nach der Magnusschen Methode oder am in situ befindlichen Kaninchendarm bewirkte die Zufuhr von Galle sofort eine sehr starke Hemmung der peristaltischen Bewegung. Umgekehrt bewirkt bei dem in situ befindlichen Dickdarm des Kaninchens Galle stets eine Steigerung der Peristaltik. Injektion von Galle ins Rektum löst prompt eine Defäkation aus. Bei dieser gesteigerten peristaltischen Bewegung des Dickdarms bleibt aber der Dünndarm in Ruhe. Dieses antagonistische Verhalten der Galle auf die verschiedenen Darmabschnitte wird biologisch leichtverständlich, wenn man daran denkt, daß die Galle, wie wir später sehen werden, bei der Verdauung der Fette besonders mitwirkt. Eine Einflußlosigkeit oder schwach hemmende Wirkung der Galle ist also in diesem Stadium der Verdauung das Förderlichste, während andererseits Steigerung der Dickdarmbewegung und fördernder

Einfluß auf die Defäkation von diesem Gesichtspunkte aus leicht erklärlich ist.

Bezüglich des Einflusses der Galle auf die verschiedenen Phasen der Verdauungsprozesse im Darm ist zu bemerken, daß der saure eiweißreiche Mageninhalt beim Uebertritt in den Darm mit der alkalischen Galle in Berührung kommt. Diese stumpft die Salzsäure des Magens ab und außerdem bildet diese mit den verdauten Eiweißkörpern einen Niederschlag, der das Pepsin mit niederreißt. Hierdurch und durch die alkalische Reaktion des Darminhalts kann die Pepsinverdauung nicht weiter gehen, während die Galle die Wirkung des Pankreasferments auf Eiweißstoffe nicht stört, vielmehr dieselbe unterstützt.

Von großer Bedeutung ist die Galle ferner für die Fettverdauung. Einerseits hat sie in besonderem Grade die Fähigkeit Fettsäuren und Seifen, die ja bei der Spaltung der Fette im Darm entstehen, zu lösen und dadurch die Resorption der Fette zu fördern, andererseits das fettspaltende Ferment des Pankreas, die Lipase, die sich im Pankreassaft nicht als solche, sondern im Zymogenstadium befindet, zu aktivieren und die fettspaltende Wirkung der Lipase auf eine bis jetzt noch nicht erklärte Weise zu steigern, und zwar scheinen die gallensauren Alkalien diese Wirkung zu veranlassen. Diese Mitwirkung der Galle bei der Fettresorption erklärt es auch, daß, wenn der Zufluß der Galle auf künstliche Weise oder durch pathologische Verhältnisse verhindert wird, die Fettverdauung in so enormem Maße daniederliegt und die Fäces große Mengen unverdautes Fett enthalten.

Ueber einen Einfluß der Galle auf die Verdauung und Resorption der Kohlehydrate ist nichts bekannt.

8e) Rückresorption von Galle und ihre Folgen. Durch die Untersuchungen von Heidenhain und Bürker ist nachgewiesen, daß die Galle unter einem sehr niedrigen Druck fließt. Kommt es nun zu irgendeiner Stauung in den Abflußwegen der Galle, so steigt dieser Druck und es findet eine Resorption der Galle statt. Für diese Drucksteigerung genügen schon die kleinsten Hindernisse in den Gallenwegen, ja schon vermehrte Sekretion oder über die Norm gesteigerte Konsistenz der Galle. Durch die Resorption der Galle kommt es zum Uebertritt derselben in die Lymph- und Blutbahn und zur Durchtränkung der Gewebe und Schleimhäute mit Gallenfarbstoffen und Ausscheidung derselben durch den Harn. Es zeigt sich dann eine Gelbfärbung der Haut und Schleimhaut. Wir haben dann das Bild des Ikterus. Früher hat man diese Form des Ikterus als hepatogen von dem hämatogenen unterschieden.

Man nahm in den Fällen, wo man keine Ursache für eine Stauung und Resorption der Galle finden konnte, an, daß der Ikterus durch Veränderungen des Blutes hervorgerufen sei, daß durch den Zerfall von roten Blutkörperchen Blutfarbstoff in Lösung gehe und in der Blutbahn selbst Hämoglobin sich in Bilirubin verwandle. Aber bei der Besprechung der Entstehung von Gallenfarbstoff aus dem Blutfarbstoff haben wir ja schon gesehen, daß die Gallenfarbstoffe in der Leber gebildet werden und daß man für diese Formen von Ikterus nach anderen Ursachen suchen muß. Viele nehmen infolgedessen für diese Formen des Ikterus eine besondere Funktionsstörung in der Leberzelle an.

8f) Bildung von Gallensteinen. Es kommt in der Gallenblase und in den Gallengängen sehr häufig zur Bildung von mehr oder weniger großen, der Zahl und Form nach verschiedenen Konkrementen, Gallensteinen. Je nach der Art des Stoffes, welcher ihre Hauptmasse ausmacht, unterscheidet man drei Arten: Steine aus Pigmentkalk, aus Cholesterin und aus Kalziumkarbonat und -phosphat. Die letzten sind beim Menschen sehr selten. Meistens findet man Cholesterinsteine. Sie können in ihrer Farbe, Form, Größe und Struktur sehr variieren. Die Farbe hängt von den mehr oder minder großen Mengen von Pigmentkalk ab, die den Cholesterinsteinen beigemengt sind. Die Bruchfläche ist radiär kristallinisch, oder zeigt kristallinische konzentrische Schichten. Durch Reibung gegeneinander in der Gallenblase nehmen sie häufig ein fazettiertes Aussehen an. Der Gehalt an Cholesterin schwankt zwischen 64,2 und 98,1 %.

Die Pigmentsteine sind beim Menschen meist sehr klein, während sie bei Rindern und Schweinen die Größe einer Walnuß überschreiten können. Sie bestehen hauptsächlich aus Bilirubinkalk und enthalten meist nur Spuren von Biliverdin.

Betreffs der verschiedenen Theorien über die Art der Entstehung der Gallensteine muß auf die Lehrbücher der Pathologie verwiesen werden. Ich will hier nur kurz erwähnen, daß man eine Erkrankung der Schleimhaut der Gallenblase durch vom Darm eingewanderte Bakterien als die primäre Erkrankung angenommen hat. An die abgestoßenen Epithelzellen lagern sich Cholesterinteilchen an und diese sind die ersten Anlagen der Gallensteine. Diese nehmen kristallinische Beschaffenheit an und wachsen durch Auflagerungen von Cholesterin und Pigmentkalk.

Andere glauben, daß die Ursache des Ausfallens des Cholesterins in einer chemischen Zersetzung der Galle durch Säuren, welche von Bakterien gebildet würden, zu

suchen sei und legen dem entzündlichen Katarrh der Schleimhaut nur geringe Bedeutung bei. Neuerdings hat dann Lichtwitz die Entstehung der Gallensteine auf physikalisch-chemischer Grundlage zu erklären versucht, indem er annimmt, daß die Galle eine Lösung von Elektrolyten und Kolloiden ist und daß es sich bei der Bildung der Gallensteine um eine Fällung von Kolloiden, besonders des Cholesterins, entweder durch die von den Bakterien produzierte Säure oder durch Eiweiß, das bei der Entzündung der Schleimhaut entsteht, oder aus abgestoßenen Epithelien stammt, handelt.

Literatur. ***P. Stöhr,*** *Lehrbuch der Histologie des Menschen, 11. Aufl., Jena 1906.* — ***O. v. Fürth,*** *Vergl. chem. Physiologie niederer Tiere (1902).* — ***F. N. Schulz,*** *Verdauungsdrüsen niederer Tiere. In C. Oppenheimer Handbuch der Biochemie Bd. III 1 S. 224 1910.* — ***E. Weinland,*** *Verdauung und Resorption bei Wirbellosen. In C. Oppenheimer Handbuch der Biochemie Bd. III 2 S. 299 1909.* — ***Vierordt,*** *Anatom.-physiol. Tabellen, Jena 1893, S. 20 bis 23.* — ***H. Gerhartz,*** *Experimentelle Wachstumsstudien, Pflüger's Arch.* ***135,*** *160, 1910.* — ***E. Weinland,*** *Physiologie der Leber. In Nagel's Handbuch der Physiologie des Menschen Bd. II S. 425 bis 515 1906.* — ***J. Wohlgemuth,*** *Leber und Galle. In C. Oppenheimer Handbuch der Biochemie Bd. III 1 S. 150 bis 223 1910.* — ***E. Pflüger,*** *Das Glykogen, 2. Aufl., Bonn 1905.* — ***O. Hammarsten,*** *Lehrbuch der physiologischen Chemie, 7. Aufl., Kapitel Leber S. 355 bis 420 1910.* — ***E. Abderhalden,*** *Lehrbuch der physiologischen Chemie, 2. Aufl. 1909.* — ***M. Cremer,*** *Physiologie des Glykogens. In Ergebnisse der Physiologie Herausgeg. von Asher und Spiro, 1. Jahrgang 1. Abt. S. 803 bis 907 1902.* — ***A. Magnus-Levy,*** *Physiologie des Stoffwechsels. In C. von Noorden Handbuch der Pathologie des Stoffwechsels Bd. I S. 2ff. 1906/07.* — ***H. Gerhartz,*** *Ueber den Einfluß der Muskelarbeit auf die Organe des thierischen Organismus. Pflüger's Arch.* ***133,*** *451, 1910.* — ***B. Schöndorff,*** *Ueber den Einfluß der Schilddrüse auf den Stoffwechsel. Pflüger's Arch.* ***67,*** *438, 1897.* — ***E. Pflüger,*** *Ueber den Einfluß einseitiger Ernährung oder Nahrungsmangels auf den Glykogengehalt des Körpers. Pflüger's Arch.* ***119,*** *S. 120 bis 121 1907.* — ***E. Pflüger und P. Junkersdorf,*** *Die Muttersubstanzen des Glykogens. Pflüger's Arch.* ***131,*** *201, 1910.* — ***P. Junkersdorf,*** *Ueber die Bildung von Kohlehydraten aus Fett. Pflüger's Arch.* ***137,*** *302, 1910.* — ***F. de Filippi,*** *Der Kohlehydratstoffwechsel bei Hunden mit Eck'scher Fistel. Zeitschr. f. Biologie* ***50,*** *66, 1908.* — ***E. Mangold,*** *Ueber den Glykogengehalt der Frösche. Pflüger's Arch.* ***121,*** *323, 1808.* — ***C. Oppenheimer,*** *Die Fermente 3. Aufl., 1910, Bd. I S. 18, 47, Bd. II S. 447.* — ***B. Schöndorff und F. Grebe,*** *Die Entstehung von Glykogen aus Formaldehyd. Pflüger's Arch.* ***138,*** *525, 1911.* — ***K. Grube,*** *Pflüger's Arch.* ***107,*** *483, 490, 1905;* ***118,*** *1, 1907;* ***139,*** *428, 1911.* — ***E. de Meyer,*** *Recherches sur la secretion interne du Pankreas Thèse S. 164, Liège 1910.* — ***E. Pick,*** *Ueber das glykogenspaltende Ferment der Leber. Hofmeister's Beiträge III 163 1902.* — ***J. Wohlgemuth,*** *Untersuchungen über die Diastasen. Biochem. Zeitschr.* ***9,*** *28, 1908.* — ***J. Schüller,*** *Ueber Phloretin- und Phloridzinglukuronsäure. Zeitschr. f. Biologie* ***56,*** *274, 1911.* — ***E. Frank und S. Isaac,*** *Beiträge zur Theorie experimenteller Diabetesformen. Arch. f. exp. Path. u. Pharm.* ***64,*** *293, 1911.* — ***Dieselben,*** *Das Wesen des gestörten Stoffwechsels bei der Phosphorvergiftung. Ebenda 64, 274, 1911.* — ***M. Jacoby,*** *Stoffwechsel und Energiewechsel der Zelle. In C. Oppenheimer Handbuch der Biochemie II 1 S. 180.* — ***W. v. Schroeder,*** *Ueber die Bildungsstätte des Harnstoffs. Arch. f. exp. Path. u. Pharmak.* ***15,*** *364, 1882.* — ***Embden und Glaessner,*** *Ueber den Ort der Aetherschwefelsäurebildung im Tierkörper. Hofmeister's Beiträge I 310, 1901.* — ***A. Schüpbach,*** *Ueber den Einfluß der Galle auf die Bewegung des Darmes. Zeitschr. f. Biologie* ***51,*** *1, 1908.* — ***L. Lichtwitz,*** *Experimentelle Untersuchungen über die Bildung von Niederschlägen in der Galle. Arch. f. klin. Med.* ***92,*** *100, 1907.*

B. Schöndorff.

Leblanc
Nicolas.

Geboren am 6. Dezember 1753 oder 1743 zu Issoudun; gestorben am 16. Januar 1806 zu St. Denis. Er war der Sohn eines Hüttendirektors in Yrvoy, studierte Medizin und wurde 1780 Chirurg des Herzogs von Orléans; beschäftigte sich gleichzeitig viel mit Chemie, besonders mit der 1783 von der Regierung gestellten Preisfrage, ein billiges Verfahren zur Sodaherstellung zu finden. 1789 gelang es ihm unter Verwendung eines Vorschlages von La Methrie das heute nach ihm benannte Verfahren zu entdecken. Der Herzog von Orléans ließ es durch d'Arcet und Dizé auf seine praktische Anwendbarkeit prüfen und bewilligte dann die Geldmittel zur Gründung einer Gesellschaft und Fabrik zu St. Denis, um die Entdeckung auszubeuten. Die Schrecken der Revolution und die Hinrichtung des Herzogs von Orléans richteten das anfangs blühende Unternehmen zugrunde, zumal da Leblanc vom Comité de salut public gezwungen wurde, sein Geheimnis zu veröffentlichen. Frankreich ließ den Mann, der ihm einen so großen Dienst geleistet hat, der sechsmal zum Verwalter des Seine-Departements und zur gesetzgebenden Versammlung gewählt worden war, verarmen. Die Fabrik wurde ihm, der ohne Betriebsmittel war, zwar zugesprochen, ihm auch Entschädigungen versprochen, aber nicht gezahlt. Ohne Aussicht, seine zahlreiche Familie der drückenden Not zu entreißen, verzweifelte er gänzlich und erstach sich im Armenhause zu St. Denis. 1855 erhielt seine Familie Schadenersatz, gleichzeitig wurde auch durch die Akademie festgestellt, daß Leblanc der alleinige Erfinder des Verfahrens sei und Dizé keinen tätigen Anteil daran gehabt habe. 1887 wurde ihm zu Paris eine Bronzestatue errichtet. Außer der Erfindung des Sodaverfahrens verdanken wir ihm vorzügliche Beobachtungen über die Erscheinungen der Kristallisation.

Seine bedeutendsten Werke sind: 1788 Ob-

servations générales sur les phénomènes de la cristallisation; 1798 Mémoires sur la fabrication du sel ammoniac et de la soude; 1802 (1786 schon der Akademie mitgeteilt) De la cristallotechnie ou Essai sur les phénomènes de la cristallisation etc. (vgl. Kobell Gesch. d. Mineralogie S. 14); 1804 Sur la confection et l'usage de la soude.

Literatur. *Comptes rendus d. l'Ac. d. sc. d. P. 1856, S. 553.* — ***H. de Mannoury d'Ectot,*** *Notice zur la vie et les travaux de Nicolas Leblanc, Paris 1855.* — ***A. Anastasi*** *(Enkel Leblancs), Nicolas Leblanc, sa vie, ses travaux etc., Paris 1884.* — ***Scheurer-Kestner,*** *Nicolas Le Blanc et la soude artificielle, Paris 1885.* — ***E. Peligot,*** *Inauguration de la statue de Nicolas Leblanc, Paris 1887.*

K. Spangenberg.

Leeuwenhoeck

Antony van.

Geboren am 24. Oktober 1632 in Delft; gestorben am 27. August 1723 daselbst. Er war zuerst Kaufmann in einer Amsterdamer Tuchhandlung, ging dann nach Delft, um sich aus Liebhaberei mit dem Verfertigen vorzüglicher stark vergrößernder Linsen abzugeben, mit denen er dann in dilettantischer Weise ohne wissenschaftlichen Plan immer neue Gegenstände untersuchte. Erst 1673 wurden seine Arbeiten weiteren Kreisen bekannt, nachdem sein Freund de Graaf einige seiner Beobachtungen an die Royal Society in London gesandt hatte, die ihn daraufhin zu ihrem Mitgliede ernannte. Leeuwenhoeck ist gewissermaßen der erste Vertreter jener Dilettanten, die mit Hilfe des Mikroskopes einem inneren Drange genügeleistend uns nicht nur die Kenntnis zahlreicher feiner Formenverhältnisse des Tierkörpers, sondern auch Aufschluß über eine ganze Welt mikroskopischer Lebensformen vermittelt haben. Trotz seiner mangelhaften Vorbildung ist die Zahl seiner anatomischen Entdeckungen nicht unbedeutend; es ist kaum ein anatomisches System zu nennen, an dem er nicht neue wichtige Tatsachen gefunden hätte. So sah er die Blutkörperchen, den Kapillarkreislauf des Froschlarvenschwanzes, die Querstreifung des Muskels usw. Eine der wichtigsten Entdeckungen ist die der Spermatozoen in der Samenflüssigkeit, die allerdings unter seiner Anleitung von einem Leydener Studenten Ludwig von Ham aus Stettin 1677 gemacht wurde. Leeuwenhoeck glaubte in den Spermatozoen den wesentlichen Bestandteil bei der Befruchtung zu erkennen und wurde so zum Haupt der Schule der sogenannten Animalkulisten, die den Samenfaden als die eigentliche Grundlage der Zeugung und Entwickelung betrachteten und die weiblichen Genitalorgane nur als Brutbehälter ansahen.

Von niederen Tieren hat Leeuwenhoeck namentlich kleine Insekten, Süßwasserhydren und Rädertiere studiert, deren Zeugung und Entwickelung er oft sorgfältig beobachtet hat; auch die ungeschlechtliche Fortpflanzung der Blattläuse hat er entdeckt. Vor allem aber ist er als der Entdecker der Infusionstiere anzusehen, von denen er eine ziemliche Anzahl schilderte; durch ihn wurden von nun an die Protozoen Lieblingsobjekte der mikroskopierenden Dilettanten. Auch auf dem Gebiete der Botanik hat Leeuwenhoeck eine Reihe von wichtigen Entdeckungen gemacht, so die Spiralgefäße, die Treppengänge, die Tüpfelgefäße der Pflanzen und den Unterschied des Baues bei monokotyledonen und dikotyledonen Stämmen. Da er sich alle seine Kenntnisse durch mühsame Arbeit aneignen mußte, was um so schwieriger war, da die Gelehrtensprache seiner Zeit Lateinisch war, er selbst aber nur Holländisch konnte, so ist es nicht zu verwundern, daß seine Untersuchungen jeglicher wissenschaftlichen Methode entbehren und mancherlei Zufälle ihn oft zu den sonderbarsten Abschweifungen veranlaßten. Dieser Fehler wird aber mehr als aufgehoben durch seine strenge Wahrheitsliebe, seinen unermüdlichen Fleiß und seine große Gewissenhaftigkeit. Ausgaben seiner Werke sind Sendbrieven, outledingen en ontdekkingen, ondervindingen en beschouwingen Leyden und Delft 1685 bis 1718 7 Bde; Lateinisch Opera omnia sive Arcana naturae ope exactissimorum microscopiorum detecta Leyden 1715 bis 1722 7 Bde; Englisch in Auswahl London 1798 bis 1801.

Literatur. ***Haaxman,*** *Antony van Leeuwenhoeck, Leyden 1875.*

W. Harms.

Legierungen.

1. Begriff der Legierung. 2. Darstellung der Legierungen. 3. Zweck der Legierung. 4. Legierungen in geschmolzenem Zustand. 5. Die Erstarrung der Metallschmelzen. 6. Zustand und Eigenschaften der erstarrten Legierungen. 7. Spezielle Legierungssysteme. 8. Phasenregel. 9. Feste Lösungen. Verbindungsfähigkeit der Elemente. Elektronentheorie der metallischen Elektrizitätsleitung.

1. Begriff der Legierung (vgl. hierzu auch den Artikel „Lösungen"). Unter einer Legierung versteht man gemeinhin eine, meist durch Zusammenschmelzen erhaltene Mischung von Metallen, die in Aussehen und Eigenschaften ebenfalls Metallcharakter aufweist. Der wissenschaftliche Begriff der Legierung ist weiter: entsprechend der Tatsache, daß eine Reihe von Metalloiden, Sauerstoff, Schwefel, Phosphor, Arsen, Kohlenstoff, zum Teil in beträchtlichen Mengen in Form von Oxyden, Sulfiden Carbiden usw. an dem Aufbau von Legierungen teilzunehmen vermögen, hat man den Metallen die „metallähnlichen" Verbindungen gleichzustellen und demnach die Legierung zu definieren als eine Mischung von Metallen untereinander oder mit „metallähnlichen" Verbindungen.

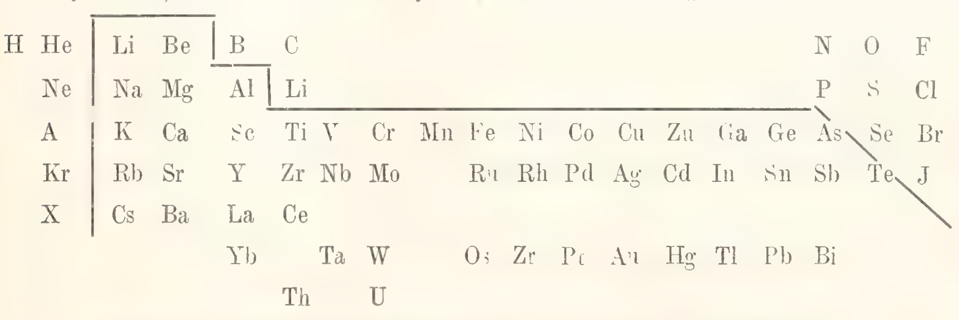
Solche Verbindungen zeigen ihre Metallähnlichkeit häufig schon durch ihr Aussehen;

sie besitzen Metallglanz, z. B. die Mineralien Bleiglanz, Kupferglanz, Pyrit. Aber auch in tiefer gehenden Beziehungen zeigen sie ein den Metallen analoges Verhalten, sie sind gute Leiter der Elektrizität und der Wärme und zwar ist ihre elektrische Leitfähigkeit keine elektrolytische. Außer bei vielen Sulfiden treten metallische Eigenschaften auch bei manchen Oxyden, Phosphiden, besonders bei Carbiden auf.

Während nun diese metallähnlichen Verbindungen von der Metallschmelze aufgenommen werden und bei der Erstarrung in der verschiedensten Weise in die feste Legierung übergehen, werden andere Stoffe von dem Schmelzfluß ausgestoßen und schwimmen an der Oberfläche. Solche Stoffe zeigen charakteristische Merkmale, die sie von den legierungsfähigen Verbindungen unterscheiden. Während diese von Wasser nicht wesentlich angegriffen werden, lösen sich die aus dem metallischen Schmelzfluß ausgeschiedenen Verbindungen mehr oder weniger, unter elektrolytischem, manchmal auch unter hydrolytischem Zerfall: die Komponenten dieser Verbindungen besitzen einen starken elektrolytischen Lösungsdruck — mindestens gilt dies für eine derselben — die Verbindungen selbst tragen Salzcharakter.

Dem Gesagten entsprechend werden wir in Legierungen nie die Halogene oder die Sauerstoffverbindungen der anderen Metalloide oder Metalloidverbindungen der Alkali- und Erdalkalimetalle antreffen.

Einen leichten Ueberblick über diese Verhältnisse gewinnt man an der Hand des periodischen Systems, das auch weiterhin bei der Frage nach der Natur der zu erwartenden Gefügebildner, ob chemische Verbindungen oder „feste Lösungen", ein zuverlässiger Führer sein wird. Durch das periodische System ist der elektrische Charakter eines Elementes festgelegt. Die Anordnung ist die von Staigmüller, in der die Aehnlichkeit oder Unähnlichkeit der Elemente in dieser Beziehung in den Entfernungen am besten zum Ausdruck kommt. Diese Fragen werden weiterhin noch eingehend behandelt werden.



H	He	Li	Be	B	C											N	O	F
	Ne	Na	Mg	Al	Li											P	S	Cl
	A	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Co	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo		Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	J
	X	Cs	Ba	La	Ce													
				Yb		Ta	W		Os	Zr	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi		
					Th		U											

Periodisches System der Elemente in der Anordnung von Steigmüller.

Man erkennt leicht, daß die Elemente, die zusammen in einer Legierung verträglich sind, auf den mittleren Teil des Systems beschränkt sind. Die extremen Glieder sind zu polarer Natur, sie bilden mit allen Elementen Verbindungen von salzartigem Charakter.

Das Zusammenwirken der beiden Faktoren, von denen der Charakter einer Verbindung abhängig ist, des elektropositiven und des elektronegativen Bestandteils, kommt bei den Sulfiden sehr deutlich zum Ausdruck. Während die Halogene überhaupt keine legierungsfähigen Verbindungen bilden, ist der Schwefel hierzu zwar nicht prinzipiell unfähig, aber der Erfolg hängt von der Art der anderen Komponente ab. Ist diese ein Alkalimetall, so trägt die Verbindung Salzcharakter, ist sie ein Schwermetall, so hat die Verbindung mehr oder weniger metallischen Charakter je nach Ionisierungstendenz des Metalls. Ein Beispiel hierfür sind Zinksulfid und Bleisulfid. Der Unterschied zeigt sich schon im Aussehen der beiden Verbindungen. Zinksulfid ist in dünnen Schichten durchsichtig, ohne Metallglanz, Bleisulfid ist undurchsichtig und zeigt starken Metallglanz.

Auch einige Oxyde besitzen metallische Eigenschaften, so die Oxyde der Platinmetalle, Palladiumoxydul, Kupferoyxdul u.a. Hauptsächlich sind es die dunkelgefärbten stark absorbierenden Verbindungen, die Metallcharakter zeigen, wie dies den Anschauungen der elektromagnetischen Lichttheorie entspricht.

2. Darstellung der Legierungen. Der allgemeinste Weg, Legierungen darzustellen, ist das Zusammenschmelzen der Bestandteile. In der Praxis verwendet man allerdings meist statt der reinen Metalle fertige Legierungen von bekanntem Gehalt, sei es, daß diese als Abfälle vorliegen, oder daß sie leichter herstellbar sind als das reine Metall — Einführung von Chrom und Mangan in der Form von Ferrochrom und Ferromangan — oder daß der reine Stoff unbequem zu handhaben ist, wie Phosphor, der z. B. in Kupfer-

legierungen in Form von hochprozentigem Phosphorkupfer eingeführt wird, oder schließlich, daß die Schmelzpunkte der Komponenten weit auseinanderliegen, in welchem Fall man geeignete Zwischenlegierungen herstellt. Als allgemeine Regel gilt, das Metall mit höherem Schmelzpunkt zuerst einzuschmelzen und dann das leichter schmelzbare einzutragen. Zur Vermeidung von Oxydation wird unter Flußmitteln oder Kohle geschmolzen.

Eine unabsichtliche Legierung findet bei allen Hüttenprozessen statt, bei denen aus den Erzen verschiedene Metalle ausgeschmolzen werden.

Einige spezielle Verfahren zur Darstellung von Legierungen sind folgende:

1. die Auflösung verschiedener Metalle (Blei, Gold) durch Quecksilber unter Bildung von Amalgamen;
2. die gleichzeitige Fällung mehrerer Metalle aus elektrolytischen Bädern;
3. die Darstellung des „Zementstahls" durch das Einbetten von heißen Eisenstücken in Kohlepulver, wobei Kohle aufgenommen wird;
4. die Bildung von Messing auf einem Kupferdraht, der mit Zinkdämpfen behandelt wird.

Auch die Springschen Versuche, Mischungen von gepulverten Metallen durch hohen Druck zu legieren, müssen hier erwähnt werden. Er stellte so die Woodsche und die Rosesche Legierung und durch wiederholte Behandlung ein messingähnliches Produkt dar.

3. Zweck der Legierung. In den reinen Metallen steht der Metalltechnik eine kleine Anzahl von Stoffen mit ganz bestimmten Eigenschaften zur Verfügung, die den vielfältigen Anforderungen der Praxis in keiner Weise genügen können. Hier werden Abstufungen und Komplexe von Eigenschaften verlangt, die kein reiner Stoff bietet, ja oft nicht bieten kann, da sich die Eigenschaften widersprechen, wie bei den Lagermetallen, die zugleich hart und plastisch sein sollen. Die Legierung der Metalle aber ermöglicht es nun, sich den gewerblichen Bedürfnissen in weitgehendem Maße anzupassen.

Schon durch geringe Zusätze werden die mechanischen und andere Eigenschaften der Metalle stark beeinflußt, die Legierungen sind vielfach härter und fester als die reinen Metalle. So wird z. B. die Härte des Kupfers durch Zinn bedeutend erhöht, noch kräftiger wirkt Aluminium.

Auch die chemische Angreifbarkeit wird verändert, bald erhöht, bald vermindert, so genügen geringe Zusätze von Zinn zum Messing, um diesem ein große Beständigkeit gegen das Meerwasser zu geben.

Außer den Eigenschaften des fertigen Produkts ist die Gießbarkeit des Materials von großer Bedeutung. Um gut gießbar zu sein, darf ein Metall keinen zu hohen Schmelzpunkt haben, es muß dünnflüssig sein, um die Formen gut auszufüllen und es darf keine Gase entwickeln, da es sonst beim Erstarren blasig wird. In allen diesen Beziehungen können durch geeignete Legierung die Mängel der reinen Metalle beseitigt oder gemildert werden.

Durch Zusätze, auch von Stoffen mit höherem Schmelzpunkt, wird der Schmelzpunkt der Metalle häufig erniedrigt, die Legierungen sind meist dünnflüssiger als die reinen Metalle, und durch entsprechende Zusätze kann die Gasentwickelung verhindert werden.

Die Gasentwickelung hat häufig ihren Grund darin, daß die Schmelzen Gase auflösen und beim Erstarren wieder abgeben „Spratzen" des Silbers (Sauerstoff). Durch Zusatz eines Metalls, das den Sauerstoff bindet, Kupfer oder besser Zink, wird dies verhindert.

In anderen Fällen ist die Gasentwickelung auf eine chemische Reaktion zurückzuführen, die in der Schmelze stattfindet. Handelskupfer z. B. enthält in der Regel neben Kupferoxydul Schwefelkupfer, es entwickelt sich schweflige Säure. Eisen und Nickel sind stets kohlenstoffhaltig. Ist außerdem noch Sauerstoff vorhanden, so bildet sich Kohlenoxyd. Setzt man Stoffe zu, die den Sauerstoff an sich ziehen und sich dann unlöslich ausscheiden oder wenigstens nicht mehr zerlegt werden, so wird das Gasen verhindert.

Dieser Erfolg wird beim Kupfer durch Zink erreicht, besser durch Aluminium, Phosphor, Silicium, beim Nickel durch Zink oder Magnesium, beim Eisen durch Mangan oder Aluminium.

4. Legierungen in geschmolzenem Zustand. In welchem Zustand befinden sich die Metalle in den Schmelzen? Sind die metallischen Lösungen den gewöhnlichen Lösungen gleichzustellen?

Das wesentliche Merkmal der echten Lösungen (zum Unterschied von den kolloidalen) ist das Verdünnungsbestreben des gelösten Stoffs, der osmotische Druck. Diese Eigenschaft und die damit in Verbindung stehenden Erscheinungen der Dampfdruckverminderung, Siedepunktserhöhung, Gefrierpunktserniedrigung finden sich in vollem Umfang bei den metallischen Lösungen.

Die Diffusionskoeffizienten der Metalle sind von derselben Größenordnung wie die der in Wasser gelösten Stoffe (Tabelle 1).

Tabelle 1.

Substanz	Temp. in °C.	k in cm²/Tage	Beobachter	Substanz	Temp. in °C.	k in cm²/Tage	Beobachter
Blei in Quecksilber .		1,37	G. Meyer	Gold in Wismut . .	500	4,52	Roberts-Aust.
„ „ Zinn	500	3,18	Roberts-Aust.	„ „ Zinn . . .	500	4,65	„
Cadmium in Quecksil.		1,56	G. Meyer	Platin in Blei . . .	490	1,69	„
Gold in Quecksilber	11	0,72	Roberts-Aust.	Rhodium in Blei . .	500	3,04	„
„ „ Blei	490	3,03	„	Silber in Zinn . . .	500	4,14	„
„ „ „	500	3,19	„	Zink in Quecksilber.		2,09	G. Meyer

Zum Vergleich: k für Normalschwefelsäure bei 12°: 1,12 im Maß der Tabelle.

Messungen der Dampfdruckerniedrigung von Quecksilber durch gelöste Metalle wurden von Ramsay ausgeführt. Er bestimmte daraus die Molekulargewichte (Tabelle 2).

Tabelle 2.

Temp.	Gelöstes Metall	Anzahl der Atome auf 100 Atome Quecksilber	Erniedrigung des Dampfdrucks in mm	Berechnetes Molekulargewicht	Atomgewicht
Siedepunkt des reinen Quecksilbers	Li	1,70	12,9	7,1	7,02
	Na	0,86	6,7	21,6	23,05
	.	1,87	17,9	18,3	
	K	1,55	15,6	29,1	39,15
	.	5,26	49,6	30,2	
	Ca	0,19	2,9	19,1	40,1
	Ba	0,90	12,3	75,7	137,4
	Mg	0,70	5,4	24,0	24,36
	.	4,82	40,6	21,5	
		1,07	7,4	70,1	
	Zn	1,93	15,5	62,1	65,4
		3,16	23,6	65,4	
		0,75	6,3	100,2	
	Cd	1,95	16,3	99,7	112,4
		3,51	27,4	103,8	
		0,81	7,6	163,6	
	Tl	1,66	13,3	186,8	204,1
		2,92	24,6	180,1	
		3,33	25,3	197,6	
	Sn	1.94	14,7	117,4	119,0
	Tb	2,00	15,4	199,9	206,9
	Bi	3,77	26,8	214,5	208,0
	Mn	1,14	8,5	55,5	55,0
	Ag	3,22	22,8	112,4	107,93
	Au	1,59	11,3	207,4	197,2
		2,80	19,2	208,1	

Die Molekulargewichte sind nach den für gewöhnliche Lösungen gültigen bekannten Formeln berechnet. Es ergibt sich die Tatsache, daß die Metalle wie im Dampfzustand so auch in metallischer Lösung meist einatomige Moleküle bilden.

Uebereinstimmende Resultate wurden von Heycock und Neville erhalten, welche die Gefrierpunktserniedrigungen von Zinnlösungen bestimmten, und von G. Meyer, der die elektromotorische Kraft von Amalgamkonzentrationsketten maß, die ja ebenfalls vom osmotischen Druck und damit von der Molekulargröße abhängig ist.

Wie bei den Flüssigkeiten findet man auch bei den metallischen Lösungen alle Stufen der Mischbarkeit. So mischt sich Blei mit Zinn in allen Verhältnissen, Blei mit Zink und Zink mit Wismut nur teilweise, wie Aether mit Wasser. Man erhält zwei Schichten, eine gesättigte Lösung von A in B und eine solche von B in A. Wie bei Flüssigkeiten ist die Ausdehnung der Mischungslücke mit der Temperatur veränderlich, wie dies aus dem Diagramm Blei — Zink (Fig. 1) hervorgeht. Bei der „kritischen" Lösungstemperatur 935° hört die Schichtenbildung auf. Blei und Zink sind dann in jedem Verhältnis mischbar.

Dieses Verhalten findet praktische Anwendung in dem Parkesprozeß zur Entsilberung des Werkbleis. Bei etwa 500° wird zu geschmolzenem silberhaltigem Blei eine kleine Menge metallisches Zink gegeben und die Mischung durchgerührt.

An der Oberfläche sammelt sich eine leichtere Schicht an, welche aus ungefähr 97% Zink und 3% Blei besteht und die Hauptmenge des Silbers enthält. Dieses wurde sozusagen „ausgeäthert".

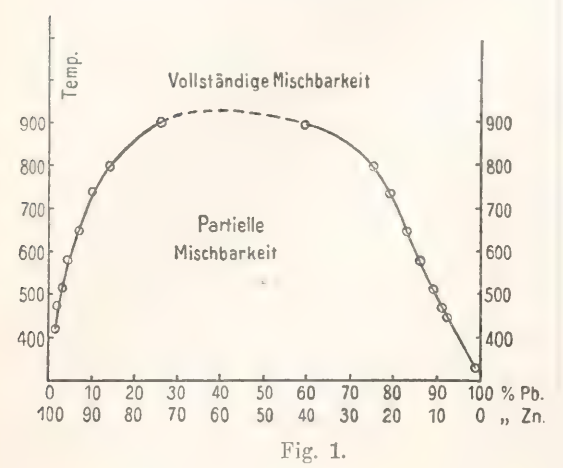


Fig. 1.

5. Die Erstarrung der Metallschmelzen (vgl. die Artikel „Aggregatzustände" und „Chemisches Gleichgewicht"). In welcher Weise vollzieht sich der Uebergang eines flüssigen Metallgemischs in den festen Zustand? Geschieht dies bei konstanter Temperatur? Haben die ausfallenden Kristalle die Zusammensetzung der Schmelze? Ist die erstarrte Legierung homogen?

Die Erfahrung lehrt, daß dies alles meistens nicht der Fall ist, die Erstarrung findet meistens über ein Temperaturintervall statt, die ausfallenden Kristalle haben nicht die Zusammensetzung der Schmelze und ein Schliff der erstarrten Legierung zeigt unter dem Mikroskop — eventuell nach Behandlung mit geeigneten Chemikalien — meist ein Bild wie etwa Granit, ein Konglomerat von verschiedenartigen Gefügebildnern.

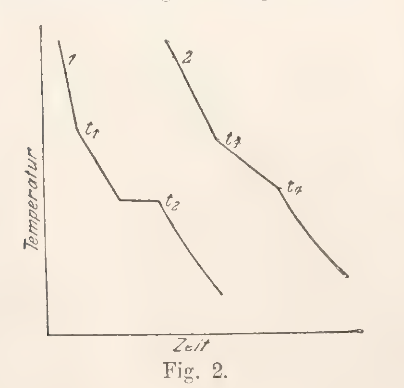


Fig. 2.

Der Verlauf der Abkühlung erfolgt bei einem reinen Stoff bekanntlich in der Weise, daß bis zu einem bestimmten Punkt ein regelmäßiger Abfall der Temperatur stattfindet, dann einige Zeit lang Temperaturkonstanz eintritt, bis alles erstarrt ist, und zum Schluß wieder ein regelmäßiges Sinken des Thermometers mit etwas veränderter Geschwindigkeit zu beobachten ist.

Dieser Fall wird bei Legierungen, wie erwähnt, nur ausnahmsweise angetroffen, in der Regel erfolgt die Abkühlung nach den Typen I und II des Diagramms Figur 2.

Typus I. Bei einer bestimmten Temperatur ändert sich die Geschwindigkeit der Abkühlung. Knickpunkt. Bei einer tieferen Temperatur findet einige Zeit lang Konstanz statt. Haltepunkt.

Typus II. Es findet zweimal eine Geschwindigkeitsänderung statt. Es treten nur zwei Knickpunkte auf.

Die Lage der Knickpunkte in Typus I und II zeigt sich von der Konzentration abhängig. Die Lage des Haltepunkts in Typus I ist bei allen Mischungen dieselbe.

Trägt man die thermischen Befunde, Knick- und Haltepunkte, einer Legierungsreihe, die bei allen Konzentrationen nach dem Typus I erstarrt, in ein Temperaturkonzentration-Koordinatensystem ein, so erhält man ein Diagramm von der Form der Figur 3, das die Verhältnisse für das System Zink-Cadmium darstellt.

Die Verbindungslinien der Knickpunkte steigen von den Schmelzpunkten der reinen

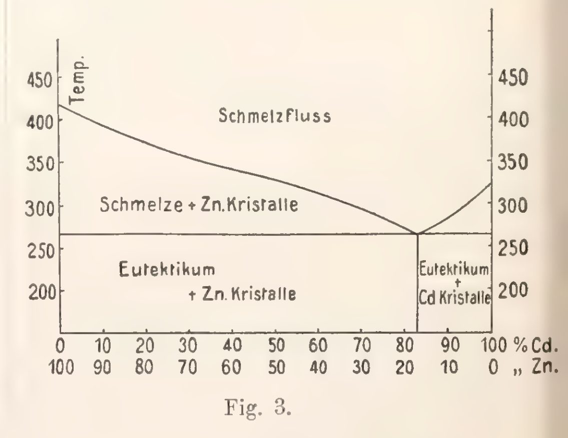


Fig. 3.

Stoffe herab, bis sie sich bei einer bestimmten Konzentration schneiden. Der Schnittpunkt heißt der eutektische Punkt, die Legierung von der entsprechenden Konzentration die eutektische Legierung.

Die Verbindungslinie der Haltepunkte ist eine Gerade, die parallel zur Konzentrationsachse durch den eutektischen Punkt geht, sie wird als die eutektische Linie bezeichnet und bringt zum Ausdruck, daß alle Gemische erst bei der entektischen Temperatur völlig erstarren.

Ein solches Diagramm ist eine Zusammenfassung aller Erfahrungen, die bei der Aufnahme von Abkühlungskurven des Systems gemacht wurden und aller möglichen Erfahrungen auf Grund von Interpolation.

Wenn eine Schmelze eutektisch erstarrt, so kann daraus im allgemeinen noch kein bestimmter Schluß auf die Zusammensetzung der ausfallenden Kristalle gezogen werden, sondern es ist dazu nötig, Schmelzen von sämtlichen Konzentrationen auf ihr Verhalten zu untersuchen. Es findet sich dann sehr oft die Erscheinung, daß erst von einer gewissen Konzentration ab ein Eutektikum auftritt, während bei geringeren Gehalten die Erstarrung nach dem Typus II Figur 2 erfolgt.

Der Typus II tritt auf, wenn die Komponenten Mischkristalle in jedem Verhältnis, oder wenigstens bis zur Konzentration der Schmelze bilden können. Das Diagramm Figur 4 zeigt einen der drei möglichen Fälle

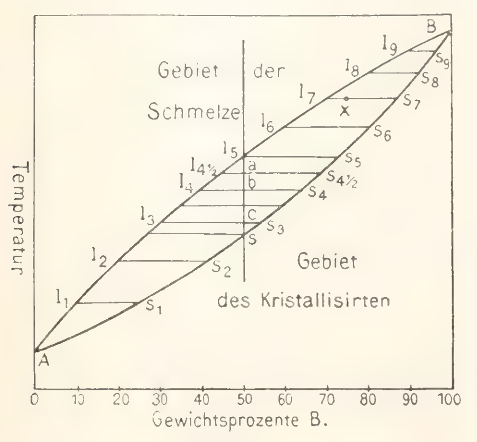


Fig. 4.

beim Bestehen einer lückenlosen Reihe von Mischkristallen.

Die obere Kurve gibt Konzentration und Temperatur der beginnenden Erstarrung, die untere Konzentration und Temperatur der beginnenden Schmelzung. Umgekehrt stellt die obere Kurve die vollendete Schmelzung, die untere die vollendete Erstarrung dar. Die obere wird als liquidus-Kurve, die untere als solidus-Kurve bezeichnet. Zieht man eine Temperaturhorizontale, so gibt ihr Schnittpunkt mit der s-Kurve die Zusammensetzung der Kristalle, die sich aus einer Schmelze abscheiden, deren Konzentration durch den Schnittpunkt mit der l-Kurve gegeben ist. Diese Konzentrationen sind die Gleichgewichtskonzentrationen. Die Vorgänge bei der Erstarrung sind nach den Angaben des Diagramms kurz folgende:

1. Bei einer für jede Konzentration der Schmelze bestimmten Temperatur, beginnt die Abscheidung von Mischkristallen, die stets reicher an der höher schmelzenden Komponente sind als die Schmelze.

2. Die Zusammensetzung der ausfallenden Kristalle ändert sich mit sinkender Temperatur fortwährend in dem Sinn, daß der Gehalt an der höher schmelzenden Komponente abnimmt.

3. Die bei höherer Temperatur ausgeschiedenen an der höher schmelzenden Komponente reicheren Kristalle setzen sich bei genügend langsamer Abkühlung mit der Schmelze in der Weise um, daß immer der jeweilige Gleichgewichtszustand erreicht wird.

Findet der vollständige Ausgleich zwischen Schmelz- und Mischkristallen statt, so ist die Erstarrung bei einer Temperatur beendet, die durch den Schnittpunkt der Konzentrationsvertikalen mit der s-Kurve gegeben ist. Das Erstarrungsintervall ist der Abstand der Schnittpunkte dieser Geraden mit beiden Kurven. Ein Eutektikum tritt nicht auf.

Nach diesem Typus erstarren u. a. die Systeme Sb-Bi, Au-Ag, Au-Pt.

Das Fehlen eines Eutektikums, wenn entsprechende Mischbarkeit im festen Zustand vorliegt, ist nun von größter Bedeutung für die Beurteilung der eutektischen Diagramme: Es kann bei diesen der Fall auftreten, der durch das Diagramm Figur 5 (Au-Ni) dargestellt ist.

Hier findet eine Beschränkung des Eutektikums in Beziehung auf die Konzentration

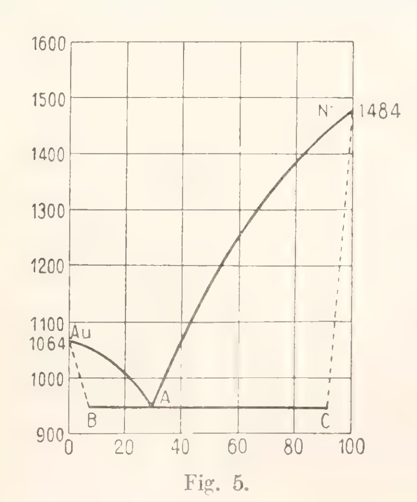


Fig. 5.

der Schmelze statt. Die eutektische Linie geht nicht bis ganz zu den reinen Komponenten. Bei geringen Gehalten an dem einen oder anderen Stoff erfolgt die völlige Erstarrung bei Temperaturen oberhalb der eutektischen, wechselnd mit der Konzentra-

tion. Mit anderen Worten, es liegt partielle Mischbarkeit im festen Zustand vor.

Damit ist nun eine Grundlage gewonnen, um zu beurteilen, was sich bei eutektischen Kristallisationen ausscheidet.

Geht die entektische Linie bis zu den reinen Komponenten, so scheiden sich diese rein aus. Geht sie nicht so weit, so scheiden sich Mischkristalle aus, deren Maximalkonzentration durch die Enden der eutektischen Linie gegeben ist.

Die Anwendung des Gefundenen auf das zuerst erwähnte Beispiel Zink-Cadmium ergibt, daß sich die beiden Metalle rein abscheiden, links Zink, rechts Cadmium, die erstarrte Legierung zeigt Zink- oder Cadmiumkristalle, eingebettet in das Eutektikum.

Was ist das Eutektikum?

Früher sah man darin eine Verbindung und bezeichnete die Eutektika der wässerigen Lösungen als Kryohydrate. Es ist aber klar, daß die Eutektika einfach Konglomerate der Komponenten darstellen, die durch gleichzeitiges Ausfallen derselben im eutektischen Punkt entstehen. Da man die Linien der beginnenden Erstarrung auch als Löslichkeitslinien auffassen kann, so liegt bei einer Ueberschreitung des eutektischen Punktes sofort Uebersättigung vor. Die Schmelze hält sich automatisch auf der Konzentration der eutektischen Legierung. Die eutektische Legierung erstarrt wie eine einheitliche Verbindung.

Die Eutektika zeigen meist eine überaus feine, lamellare Struktur, der sie ihren Namen verdanken (Eutektikum = das Schöngefügte).

Das Verhalten der mit einem Eutektikum erstarrenden Legierungen ist von großer praktischer Bedeutung. Einerseits wird es für verschiedene metallurgische Prozesse ausgenützt, andererseits führt es zu sehr unangenehmen Erscheinungen beim Gießen, indem inhomogene Gußstücke erhalten werden, die Legierung „saigert“. An den Wänden, wo die Abkühlung beginnt, scheiden sich die reinen Kristalle ab, die Unreinheiten sammeln sich im Eutektikum in der Mitte und oben. Man gießt deshalb oft „mit verlorenem Kopf“.

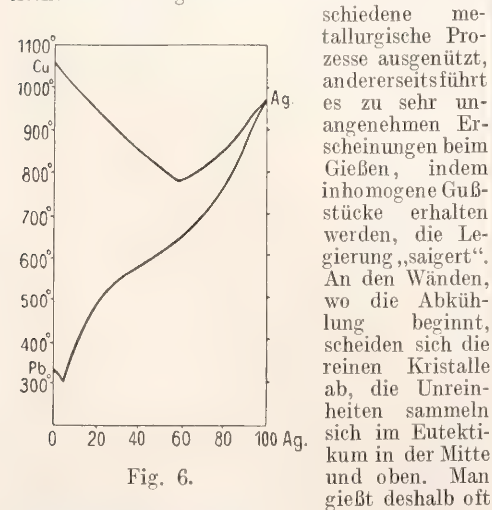


Fig. 6.

Ein metallurgischer Prozeß, der von der Existenz eines Eutektikums Nutzen zieht, ist z. B. die Gewinnung des Silbers aus Werkblei, dessen Silbergehalt zu gering ist, um eine direkte Verarbeitung zu gestatten. Man reichert durch „Ausfrieren“ reinen Bleis das Silber in der zurückbleibenden Schmelze an. Das Schmelzdiagramm zeigt, daß man den Silbergehalt auf diese Weise nicht höher als auf 2,6% bringen kann d. h. auf die eutektische Konzentration (siehe Fig. 6).

Die Tabelle 3 gibt für eine Reihe von Gemischen die Schmelztemperaturen der Komponenten und die eutektische Temperatur.

Tabelle 3.

	Komponenten				Eutektikum	
	A	Schmelzpunkt °C	B	Schmelzpunkt °C	Temp. °C	Konzentr. in Atom %
1	Ag	960	Cu	1081	778	40
2	Cd	320	Zn	418,5	264	26,5
3	Sn	232	Pb	322	183	23
4	Sn	232	Ag	960	221	3,8
5	Tb	328	Ag	960	303	4,4
6	Zn	418,5	Al	654	381	11
7	Tl	301	Cd	320	203,5	27,2
8	Sn	232	Zn	418,5	198	16
9	Sn	232	Cd	320	178	31,2
10	Cd	320	Pb	322	249	67,3
11	Bi	268	Cd	320	149	55,7
12	Sn	232	Tl	301	170,2	31
13	Sn	232	B	268	135	42
14	Pb	322	Sb	632	228	20,5
15	Bi	268	Pb	322	125	43,8

Sämtliche Fälle, die bei der Erstarrung von binären Legierungen möglich sind, hat Roozeboom in fünf Typen dargestellt, die er in zwei Gruppen zusammenfaßt, die durch totale oder partielle Mischbarkeit im festen Zustand gekennzeichnet sind.

Von der ersten Gruppe wurde Typus I schon behandelt (Fig. 5), außerdem bestehen noch die Typen II und III (Fig. 7 und 8). Diese

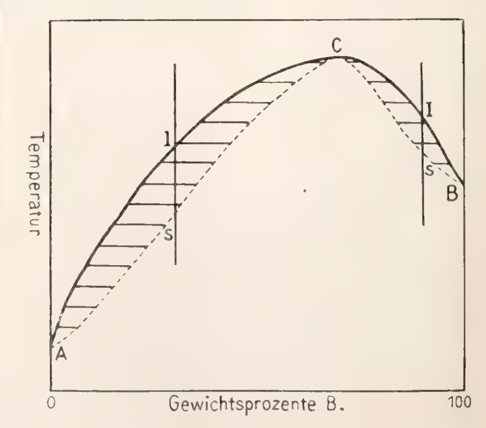


Fig. 7.

erinnern an die Dampfdruck- und Siedepunktskurven der Flüssigkeitsgemische. Wie dort Maxima und Minima des Siedepunkts auftreten, so hier Maxima und Minima des Schmelzpunkts. Legierungen von der Zusammensetzung eines Maximums oder Minimums heißen „kongruent schmelzende", Schmelze und feste Legierung besitzen dieselbe Konzentration.

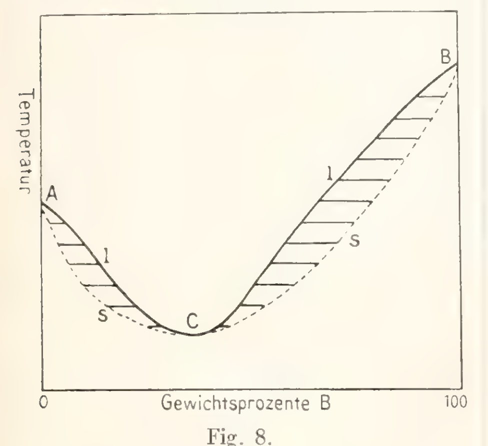


Fig. 8.

Zu der zweiten Gruppe gehört Typus V, der in Figur 5 dargestellt wurde. Als sein Grenzfall erscheint der zuerst behandelte Fall der völligen Nichtmischbarkeit (Zn-Cd Fig. 3), der als Va dem Haupttypus angeschlossen wird.

Es bleibt noch Typus IV (Fig. 9), der sehr interessante Erscheinungen zeigt. Infolge der Mischungslücke erscheint die s-Kurve gebrochen. Mischkristalle von der zwischen D und E liegenden Konzentration existieren nicht. Wenn daher die Kristallisation in E angekommen ist, findet zwischen den ausgeschiedenen Kristallen und der Schmelze eine Reaktion statt, bei der sich die Kristalle von der Konzentration D bilden. Bei diesem Vorgang wird Wärme frei, die Abkühlungskurve zeigt einen Haltepunkt. Das System besitzt einen Umwandlungspunkt. Von D ab geht die Erstarrung in normaler Weise weiter. Mit sinkender Temperatur erweitert sich die Mischungslücke.

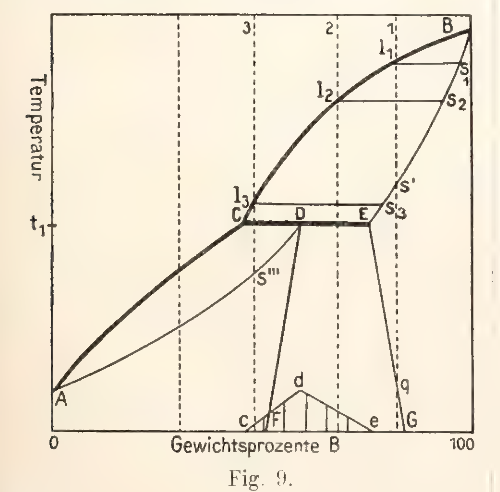


Fig. 9.

Treten zwischen den Komponenten Verbindungen auf, so zerfällt das Schmelzdiagramm in mehrere Systeme, welche die Verbindungen unter sich oder mit den Komponenten bilden. Die Erstarrung in jedem Einzelsystem kann nach irgendeinem der besprochenen Typen erfolgen (s. Diagramm Fig. 10).

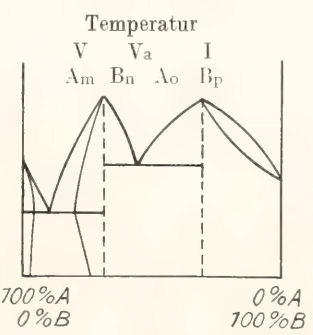


Fig. 10.

Eine Komplikation, die sehr viel theoretisches Interesse bietet, entsteht, wenn die Verbindung unterhalb ihres Schmelzpunkts sich zersetzt. Der Fall wird durch das Diagramm Figur 11 dargestellt. Das Maximum der Kurve CD entspricht der Verbindung A_mB_n. Diese sollte nach dem Gesagten das

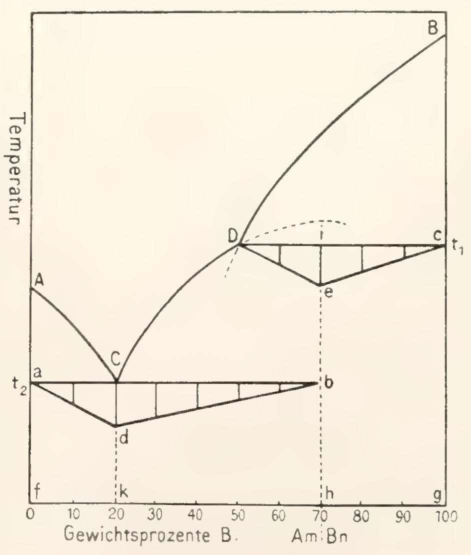


Fig. 11.

Diagramm in 2 Systeme scheiden. Statt dessen sieht man, daß die Erstarrungslinie mit einer geringen Richtungsänderung von B zum eutektischen Punkt herabsteigt. Von B bis D scheidet sich die Komponente B ab, von D bis C die Verbindung $A_m B_n$. Bei der dem Punkt D entsprechenden Temperatur findet zwischen den ausgeschiedenen Kristallen und der Schmelze eine Reaktion unter Bildung der Verbindung $A_m B_n$ statt.

Diese Reaktion hat nun Tammann benützt, um die Zusammensetzung der Verbindung zu ermitteln: Auf den Abkühlungskurven zeigt sich infolge der Reaktion ein Haltepunkt von größerer oder geringerer Dauer. Trägt man diese Zeiten senkrecht auf der Umwandlungslinie Wc auf, so erhält man ein Dreieck, dessen Spitze der Verbindung entspricht.

Ein weiteres Kriterium fand Tammann darin, daß bei dieser Konzentration die eutektische Linie aufhören muß: das Ende der eutektischen Linie kann aber graphisch extrapoliert werden, wenn man die eutektischen Haltezeiten in derselben Weise auf der eutektischen Linie aufträgt.

Dieser Fall wird als „Fall des verdeckten Maximums" bezeichnet.

Sind die beiden Komponenten in flüssigem Zustand nur partiell mischbar, so treten bei allen Diagrammen entsprechende Aenderungen ein. In Figur 12 ist der Fall

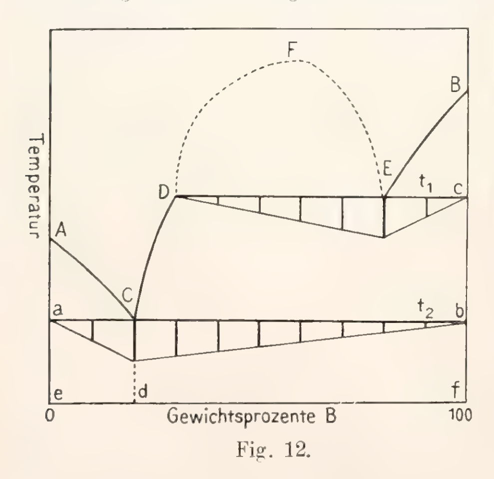


Fig. 12.

eines einfachen eutektischen Diagramms dargestellt. Bei einer bestimmten Temperatur tritt neben der gesättigten Lösung von A in B eine solche von B in A auf, bei weiterer Entziehung von Wärme wird bei gleichbleibender Temperatur jene ganz aufgebraucht.

Auch im festen Zustand können reine Stoffe und Verbindungen noch Veränderungen erleiden, die oft mit beträchtlichen Wärmetönungen verknüpft sind und so in derselben Weise wie die Erstarrungserscheinungen zur Aufnahme von Abkühlungskurven und Diagrammen benützt werden können. Ja man ist sogar in manchen Fällen genötigt, Reaktionen im festen Zustand anzunehmen. Die umkehrbaren Umwandlungen im festen Zustand sind in jeder Beziehung den Aenderungen des Aggregatzustandes gleichzustellen. Sie sind wie diese bei einem bestimmten Druck an eine bestimmte Temperatur gebunden, sie erleiden wie der Schmelzpunkt durch Zusätze Depressionen.

Ein Beispiel für die Umwandlungen eines reinen Stoffs sind die Modifikationen des Eisens, α-, β- und γ-Eisen. Die Umwandlungspunkte liegen bei 780° und 880°. Erst unterhalb 780°, in seiner α-Form, ist das Eisen magnetisch.

Figur 13 zeigt die Umwandlung einer

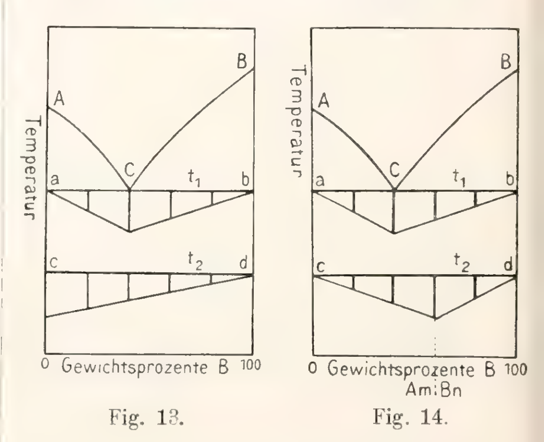


Fig. 13. Fig. 14.

Komponente, Figur 14 die Bildung einer Verbindung. Beweis in beiden Fällen, wie bei dem „verdeckten Maximum": die Lage des Maximums der Wärmetönung.

Figur 15 zeigt die Umwandlungen bei Legierungen von völliger Mischbarkeit im festen Zustand. Nach der Erstarrung liegen beide Komponenten in Mischkristallen der β-Form vor. Die α-Formen sollen gleichfalls in jedem Verhältnis mischbar sein. Man hat dann eine Wiederholung der Verhältnisse beim Erstarrungsvorgang: Umwandlung einer homogenen Lösung in eine andere homogene Lösung.

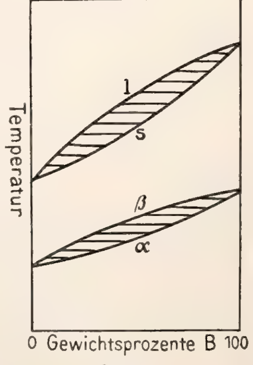


Fig. 15.

Beide Vorgänge werden durch dasselbe Diagramm dargestellt (Fig. 15). Die l-Kurve

wird als β-Kurve, die s-Kurve als α-Kurve bezeichnet.

Weitere Umwandlungen im festen Zustand sind die Veränderungen der einer Mischungslücke anliegenden gesättigten festen Lösungen (s. Diagramm Fig. 9).

Aus manchen Schmelzen scheiden sich „metastabile Kristallarten" (vgl. die Artikel „Aggregatzustände" und „Chemisches Gleichgewicht") ab, d. h. Kristalle, die eigentlich in dem betreffenden Temperaturgebiet nicht bestehen können und deshalb sofort zerfallen, wenn die stabile Kristallart „eingeimpft" wird. Durch „Abschrecken" können diese metastabilen Kristalle erhalten bleiben, indem das System rasch durch das Zerfallsgebiet hindurch und auf Temperaturen gebracht wird, bei denen alle Umwandlungen unendlich langsam vor sich gehen.

Metastabile Kristalle bilden z. B. die Verbindungen Sb_2Cd_3 und der Cementit Fe_3C, von dem bei den Eisenkohlenstofflegierungen die Rede sein wird.

Die ternären Legierungen sind ziemlich kompliziert, ihre graphische Darstellung erfordert räumliche Diagramme.

Aus den geometrischen Eigenschaften des gleichseitigen Dreiecks geht hervor, daß jeder Punkt im Innern desselben eine bestimmte Zusammensetzung eines ternären Systems darzustellen vermag, da ja die Summe der Projektionen auf die drei Seiten immer den gleichen Wert besitzt (Fig. 16).

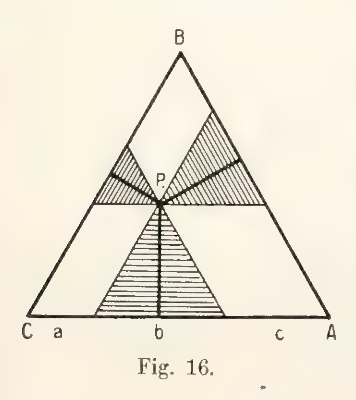


Fig. 16.

Die Punkte der Seiten stellen binäre Gemische, die Eckpunkte die reinen Komponenten dar.

Errichtet man in den Ecken Senkrechte als Temperaturachsen, so erhält man ein dreiseitiges Prisma.

Die Figur 17 stellt schematisch ein ternäres System dar, bei dem die binären Diagramme der Komponenten — wie z. B. bei der Legierung Zinn = Wismut = Blei — alle zu dem rein eutektischen Typus gehören. Diese Diagramme werden auf den Prismenseiten aufgetragen. Von den drei binären eutektischen Punkten steigen drei Raumkurven zum ternären Eutektikum hinab. Durch die drei Raumkurven und die binären Erstarrungskurven werden drei gewölbte Flächen gelegt.

Durch jeden Punkt einer solchen Fläche ist die Ausscheidung einer Komponente bestimmt, durch jeden Punkt einer Raumkurve die Ausscheidung eines binären Eutetikums.

Legt man durch das Modell in verschiedener Höhe Horizontalebenen und projiziert die Schnittlinien derselben mit den Flächen auf die Basis, so erhält man ein System von Isothermen, das an die Höhenkurven der Landkarten erinnert (Fig. 18).

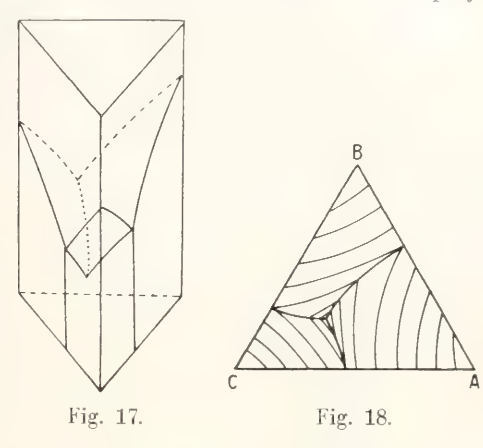


Fig. 17. Fig. 18.

Die Methode, nach der die mitgeteilten Diagramme erhalten wurden, hat Tammann als „thermische Analyse" bezeichnet. Sie beruht, um es kurz zu wiederholen, darauf, daß jeder mit einer Wärmetönung verbundene Vorgang in dem zu untersuchenden Material — Aenderungen des Aggregatzustandes in gleicher Weise wie Aenderungen der Modifikation und chemische Reaktionen — sich in dem regelmäßigen Verlauf der Abkühlung oder Erhitzung durch eine Störung bemerkbar macht, in der graphischen Darstellung durch Knick- und Haltepunkte.

Bei der praktischen Ausführung ist darauf zu achten, daß die Abkühlung mit einer solchen Geschwindigkeit erfolgt, daß die Knick- und Haltepunkte auf der Kurve deutlich erkennbar werden. Die Temperatur wird am besten durch Thermoelemente gemessen.

Die thermische Analyse ist die eigentliche Methode der Metallographie, in dem sie auf Grund direkter Beobachtungen und geeigneter Kombinationen und Schlußfolgerungen nicht nur über den Zustand der erstarrten Legierung sondern über ihr ganzes Verhalten während der Abkühlung, über ihre Vorgeschichte, Auskunft gibt.

Sie wird ergänzungsbedürftig in allen Fällen, wo infolge zu geringer Wärmetönung ein Vorgang nicht mit Sicherheit festgestellt werden kann, oder wenn rasch und genau Art und Menge der Gefügebildner ermittelt werden soll. Das Diagramm ergibt die Kristallarten, die bei einer bestimmten chemischen Zusammensetzung der Schmelze bei idealem Verlauf der Erstarrung zu erwarten sind. Der wirkliche Zustand der Legierung, der durch die Geschwindigkeit der Abkühlung bestimmt wird und sich wesentlich von dem theoretisch geforderten unterscheiden kann — Einschluß von zuerst ausgeschiedenen Kristallen durch Reaktionsprodukte, die den Fortgang der Umsetzung verhindern, Erhaltung instabiler Kristallarten und mangelhafter Ausgleich verschieden konzentrierter Mischkristalle durch „Abschreckung" — könnte durch den Verlauf des umgekehrten Vorgangs, der Schmelzung also durch Aufnahme einer Erhitzungskurve festgestellt werden. Doch führt hier die mikroskopische Beobachtung rascher zum Ziel, wenn erst einmal durch irgendeine Methode das Diagramm und damit die möglichen Kristallarten ermittelt sind.

Der Fall, daß die thermische Analyse wegen zu geringer Wärmetönung unzureichend wird, soll an dem folgenden Beispiel dargelegt werden: Typus Va (Abscheidung der reinen Komponenten) kann von den extremen Fällen des Typus V (Mischkristalle mit sehr geringem Gehalt) an der anderen Komponente nur dadurch unterschieden werden, daß sich die eutektische Linie im Fall V nicht über den ganzen Konzentrationsbereich erstreckt. Nun ist aber bei geringen Zusätzen die Menge des Eutektikums und die entsprechende Wärmetönung sehr gering, so daß aus experimentellen Gründen ein Haltepunkt nicht mehr festgestellt werden kann. Hier ist die mikroskopische Beobachtung und die Messung der elektrischen Leitfähigkeit, wie später gezeigt werden wird, der thermischen Analyse überlegen. Auf jeden Fall steigt der Wert eines Diagramms mit jeder neuen Methode, durch die seine Angaben bestätigt werden.

Zur Aufnahme der Diagramme kann prinzipiell jede Eigenschaft herangezogen werden, auf welche eine Aenderung des Aggregatzustandes oder der Modifikation in genügender Weise Einfluß hat.

So wird bei der dilatometrischen Methode (vgl. den Artikel „Dichte") die Aenderung des Volums bei der Erstarrung benützt. Sie besitzt aus praktischen Gründen für das Studium der Legierungen keine Bedeutung.

Dasselbe gilt für die Methode, die eigentlich am nächsten liegt und in der „nassen" Chemie allgemein gebräuchlich ist: Analyse der Kristalle und der Lösung, die bei konstanter Temperatur miteinander im Gleichgewicht sind, mit anderen Worten, die Aufnahme von Löslichkeitskurven (vgl. den Artikel „Lösungen"). Als solche können ja, wie schon erwähnt, die Erstarrungskurven aufgefaßt werden. Die hierzu nötige Trennung von Kristallen und Schmelze stößt auf zu große experimentelle Schwierigkeiten.

6. Zustand und Eigenschaften der erstarrten Legierungen. Die Untersuchungsmethoden der erstarrten Legierungen zerfallen in zwei Gruppen: die einen stellen die Gefügebildner direkt fest, die anderen untersuchen die von dem Aufbau der Legierungen abhängigen Eigenschaften und schließen aus der Abwandlung derselben nach der Konzentration auf den inneren Zustand — ob Konglomerat, Mischkristall oder chemische Verbindung.

Es sind im wesentlichen folgende:

I. Gruppe:

a) Die mikroskopische Untersuchung der Schliffe.

b) Die „Rückstandsanalyse".

II. Gruppe:

c) Die Untersuchung der elektromotorischen Kraft.

d) Die Untersuchung der elektrischen Leitfähigkeit.

e) Die Untersuchung der thermoelektrischen Kraft.

f) Die Untersuchung der Härte („Fließdruck").

g) Die Untersuchung der spezifischen Dichte und des spezifischen Volums.

a) Die mikroskopische Untersuchung (vgl. den Artikel „Mikroskopische Technik") ist neben der thermischen Analyse die Hauptmethode der Metallographie. Sie wird in der Weise ausgeführt, daß man das Auftreten und Verschwinden der einzelnen Gefügebestandteile mit der wechselnden Kon-

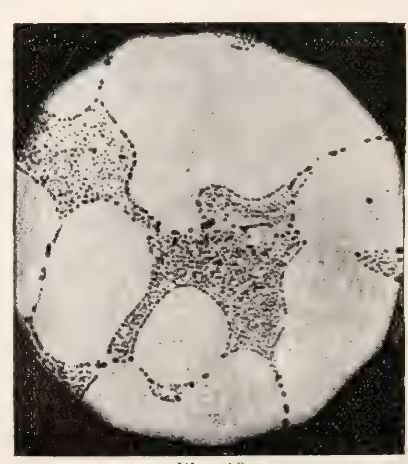


Fig. 19.

zentration der untersuchten Legierungen feststellt und den Befund in geeigneter Weise in einem Diagramm niederlegt.

Durch Planimetrieren der einzelnen Kristallarten können quantitative Analysen ausgeführt werden, die der chemischen Analyse an Genauigkeit gleich, an Schnelligkeit weit überlegen sind.

Ein gutes Beispiel hierfür sind die Sauerstoffbestimmungen im Kupfer durch Ausmessung des Cu-Cu_2O=Eutektikums (Tabelle 4 und Fig. 19).

Tabelle 4.

Gewichtsanalytisch gefunden		Metallographisch durch Messung gefunden	
Cu_2O	O	Cu_2O	O
0,47 %	0,053 %	0,56 %	0,063 %
0,51 %	0,057 %	0,49 %	0,055 %
0,84 %	0,094 %	0,89 %	0,099 %
1,86 %	0,20 %	1,79 %	0,20 %
1,98 %	0,22 %	1,85 %	0,21 %

Die Bedeutung der mikroskopischen Methode für die Feststellung der eutektischen Linie wurde schon erwähnt. So gelang es Osmond die Bildung von Silberkupfermischkristallen bis zu einem Silbergehalt von etwa 1% nachzuweisen, indem erst bei höheren Konzentrationen ein Eutektikum auftritt.

Cementit (Fe_3C) und Kupfer-Zinnverbindungen wurden mikrographisch nachgewiesen.

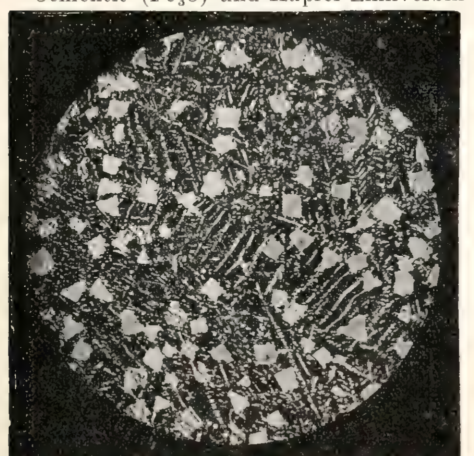


Fig. 19a.

b) Die Rückstandsanalyse.

Zeigen die Gefügebildner genügend verschiedene Angreifbarkeit gegen Säuren und andere Reagentien, so kann man die einzelnen Bestandteile isolieren und der Analyse unterwerfen.

Ein Beispiel bietet das Verhalten der Eisenkohlenstofflegierungen gegen verdünnte und konzentrierte Säuren.

1. Eine Legierung mit weniger als 2 % Kohlenstoff (Stahl) langsam abgekühlt oder „angelassen" hinterläßt bei Behandlung mit verdünnten Säuren einen Rückstand, der allen Kohlenstoff enthält: Cementit (Fe_3C).

2. Ein Stahl derselben Zusammensetzung, rasch abgekühlt, „abgeschreckt", löst sich unter Entwickelung von Kohlenwasserstoffen ohne Rückstand.

3. Eine Legierung mit mehr als 4 % Kohlenstoff, langsam erkaltet, hinterläßt bei Behandlung mit verdünnter Säure Cementit und außerdem noch einen anderen Bestandteil. Löst man den Cementit mit starken Säuren heraus, so hinterbleibt Graphit.

Auf der gleichen Grundlage beruht die Aetzung der Metallschliffe.

Die Resultate der Methode sind aber mit Vorsicht aufzunehmen, da immer mit der Möglichkeit einer Veränderung während der Behandlung zu rechnen ist.

c) Die elektrolytische Lösungstension der Legierungen (vgl. die Artikel „Elektrochemisches Potential" und „Galvanische Ketten"). Die Legierung wird mit einer Elektrode aus dem weniger edlen Metall zu einer galvanischen Kette kombiniert, deren Elektrolyt aus einem Salz der weniger edlen Komponente besteht.

Messungen solcher elektromotorischen Kräfte wurden von Herschkowitsch, Puschin und anderen ausgeführt. Die Resultate von Puschin scheinen die besten zu sein. Er findet folgende Gesetzmäßigkeiten:

1. Bilden die Komponenten mechanische Konglomerate, so tritt keine Potentialdifferenz auf (Fig. 20).

2. Sind die Komponenten in allen Ver-

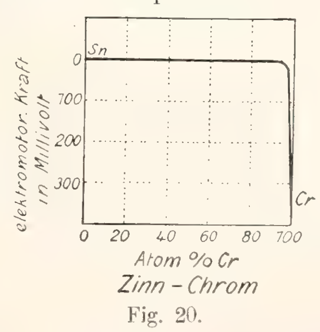


Fig. 20.

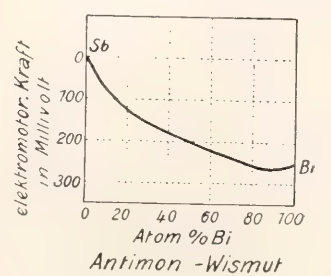


Fig. 21.

hältnissen mischbar, so steigt die elektromotorische Kraft in regelmäßiger Weise mit dem Gehalt an der edleren Komponente (Fig. 21).

3. Bilden die Komponenten eine Verbindung, so tritt ein Sprung in der Kurve auf (Fig. 22).

In Fig. 23 ist eine Kombination von 2. und 3. dargestellt.

Dieses Verhalten erklärt sich in einfacher Weise aus der Tatsache, daß das Potential einer Elektrode immer durch den am wenigsten edlen Bestandteil bestimmt wird, wenn dieser in freiem Zustand vorliegt.

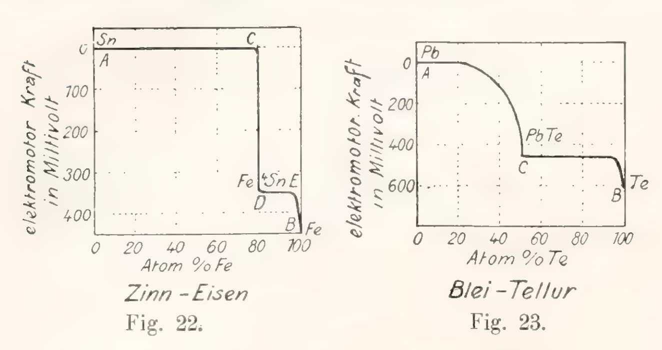


Fig. 22. Fig. 23.

Dadurch ist das Verhalten der Konglomerate gegeben, seien es solche der Komponenten unter sich oder mit Verbindungen: sobald die unedle Komponente verschwindet, tritt ein Potentialsprung auf. Dies ist der Fall, wenn die Legierung die Zusammensetzung der Verbindung besitzt (Fig. 22) oder in die reine edlere Komponente übergeht (Fig. 20). Bei Mischkristallen dagegen tritt eine allmähliche Verminderung der Lösungstension und damit eine Steigerung der Potentialdifferenz ein (Fig. 21).

Wegen der sprungweisen Aenderung der beobachteten Eigenschaft (gegenüber mehr oder weniger scharfen einfachen Richtungsänderungen bei anderen Methoden) scheint die Messung der elektrolytischen Lösungstension besonders geeignet zur Erforschung der Konstitution der Legierungen. Doch liegen große experimentelle Schwierigkeiten vor.

d) Die elektrische Leitfähigkeit der Legierungen (vgl. den Artikel „Elektrizitätsleitung“). Ganz besonders interessante Beziehungen zur Konstitution der Legierungen ergibt die Messung der elektrischen Leitfähigkeit.

Die praktische Ausführung stößt auf beträchtliche Schwierigkeiten wegen der Inhomogenität des Materials und der Sprödigkeit vieler Legierungen, die es unmöglich macht, sie in die zur Messung geeignete Drahtform zu bringen.

Es liegen sehr viele Beobachtungen, hauptsächlich von Matthiesen vor, die von Le Chatelier und in neuerer Zeit von Gürtler theoretisch verwertet worden sind.

Folgende Beziehungen haben sich ergeben:

1. Konglomerate zeigen additive Leitfähigkeit (Fig. 24).

2. Mischkristalle zeigen starke Erniedrigung der Leitfähigkeit schon bei ganz geringem Gehalt an der anderen Komponente (Fig. 25).

3. Verbindungen machen sich häufig durch das Auftreten von Spitzen bemerkbar (Fig. 26).

4. Die Leitfähigkeit einer Legierung ist immer geringer als die der besser leitenden Komponente.

Aehnliche Gesetzmäßigkeiten zeigt der Temperaturkoeffizient der Leitfähigkeit oder des Widerstands. Gürtler spricht dies aus wie folgt:

„Im allgemeinen besteht Proportionalität zwischen den Leitfähigkeiten der verschiedenen Legierungen zweier Komponenten und den zugehörigen Temperaturkoeffizienten auch dann, wenn Mischkristalle und Verbindungen in beliebiger Ausdehnung und Anzahl vorliegen.“

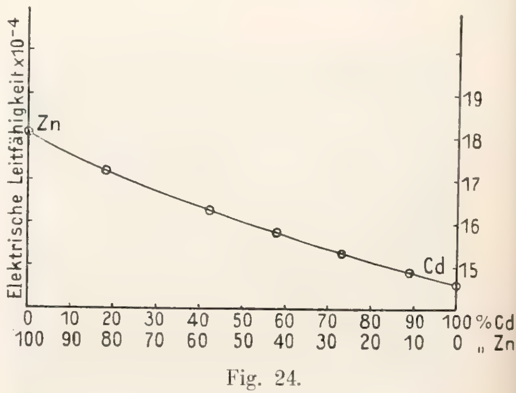


Fig. 24.

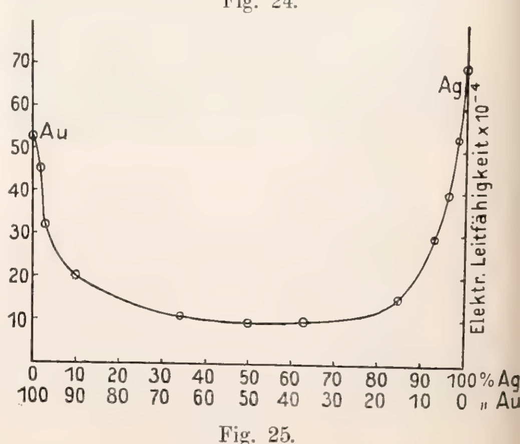


Fig. 25.

„Ausnahmslos entspricht die Gestalt der Kurven des Temperaturkoeffizienten in seiner Abhängigkeit von der Volumkonzentration genau der Kurve der Leitfähigkeit."

Man erkennt dies leicht, wenn man die Figuren 25 und 27 vergleicht.

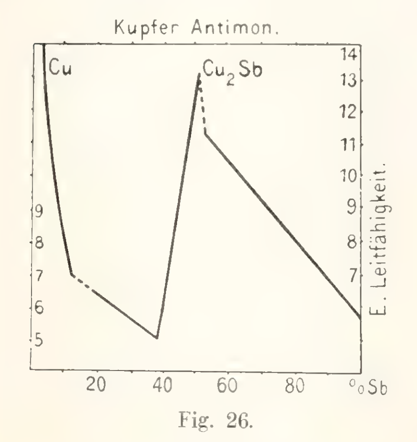


Fig. 26.

Konglomerate haben also den Temperaturkoeffizienten der reinen Metalle. Der Widerstand verschwindet wie bei diesen beim absoluten Nullpunkt. Mischkristalle dagegen haben meist einen sehr geringen Temperaturkoeffizienten. Ihr Widerstand ist von der Temperatur wenig oder gar nicht abhängig, er verschwindet deshalb beim absoluten Nullpunkt nicht.

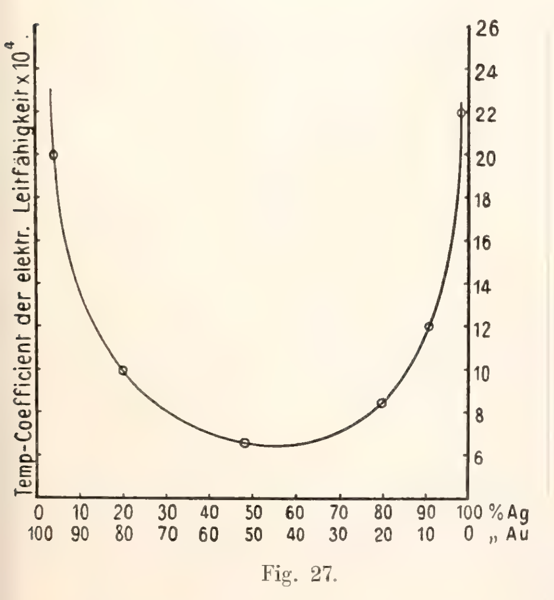


Fig. 27.

Die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit ist von besonderer Bedeutung für den Nachweis von geringer Mischbarkeit im festen Zustand. Hier wo die thermische Analyse aus den oben erwähnten Gründen versagt, gibt oft die Messung der Leitfähigkeit Aufschluß wegen der enormen Empfindlichkeit dieser Eigenschaft selbst gegen minimale Verunreinigungen.

Die Eigenschaften der Mischkristalle in Beziehung auf die elektrische Leitfähigkeit sind von großer theoretischer und technischer Bedeutung. Von den theoretischen Zusammenhängen soll im Schlußabschnitt die Rede sein, die technische Bedeutung der Mischkristalle beruht auf ihrem großen Widerstand und ihrem geringen Temperaturkoeffizienten: das Material der Präzisionswiderstände, Manganin, Konstantan (60 Cu 40 Ni) besteht aus derartigen Legierungen.

Die Tabelle zeigt die Kleinheit des Temperaturkoeffizienten für eine Reihe von Legierungen (Tabelle 5).

Tabelle 5.

Metall	Temp.-Koeff. des Widerstands bei 18°
Cu 100%	+ 0,00428
Cu 80% Ni 20% . .	0,000262
Cu 54% Ni 46% . .	0,0000
Ni 100%	0,00395
Au 100%	0,00368
Au 90% Ag 10% . .	0,00124
Au 66,6% Ag 33,32%	0,00067
Ag 100%	0,00400

Es ist nun in hohem Grade auffallend, daß eine ganze Reihe anderer physikalischer Eigenschaften eine weitgehende Uebereinstimmung mit der elektrischen Leitfähigkeit in bezug auf die Abhängigkeit von der Konzentration zeigen: Die Diagramme für die thermoelektrische Kraft und die Härte weisen dieselben Typen auf wie die Diagramme für die elektrische Leitfähigkeit und für den Temperaturkoeffizienten der Leitfähigkeit.

Figur 28 zeigt die Kurven der Härte, Thermokraft und elektrischen Leitfähigkeit für den Fall lückenloser Mischkristallbildung.

e) Die thermoelektrische Kraft der Legierungen (vgl. den Artikel „Thermoelektrizität"). Die thermoelektrische Kraft der Legierungen wurde in neuerer Zeit von Rudolfi und von Haken untersucht.

Sie kamen zu folgenden Resultaten:

1. Mischen sich die beiden Komponenten einer binären Legierung im kristallisierten Zustand nicht, so erhält man für die thermoelektrische Kraft in Abhängigkeit von der Konzentration eine gerade Linie (Fig. 29).

2. Bilden die Komponenten eine ununterbrochene Reihe von Mischkristallen, so erhält man eine U-förmig gebogene Kurve (Fig. 30).

3. Bilden die Komponenten eine Verbindung, so zeigt die Kurve einen scharfen Knick (Fig. 31).

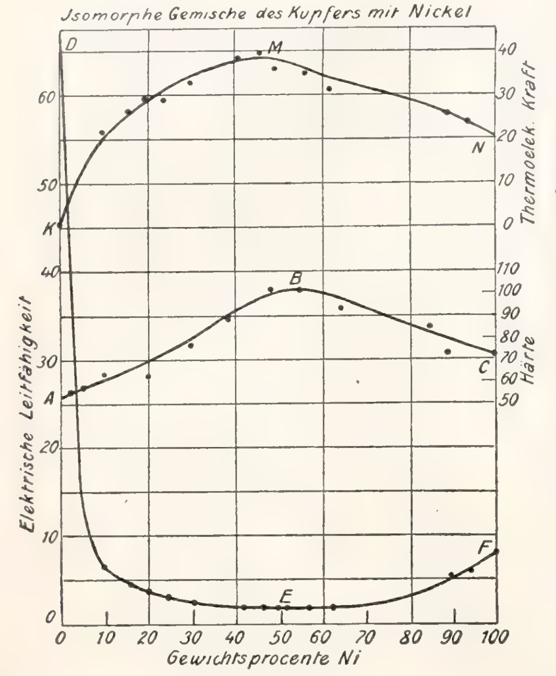


Fig. 28. A B C Härtekurve; D E F Leitfähigkeitskurve; K M N Thermoelektrische Kraft in bezug auf Kupfer.

Für die Herstellung von Thermoelementen und Thermosäulen ergibt sich folgendes:

Verbindungen zeigen gegen eine reine Komponente große Potentialdifferenzen, sie sind aber brüchig und demnach nur für Thermosäulen zu verwenden,

Für die Thermoelemente kommen nur die haltbaren Kombinationen: Reine Komponente — Mischkristalllegierung in Betracht.

Praktische Verwendung haben besonders die Ketten Kupfer-Konstantan (60 Cu 40 Ni) und Platin = Platin (Rhodium) gefunden.

f) Die Härte der Legierungen. Ueber die Beziehungen der Härte zur Konstitution der Legierungen hat Kurnakow eingehende Untersuchungen angestellt, er findet „daß die Untersuchung der Härte gestattet, nicht nur die Existenz fester Metallösungen zu konstatieren, sondern auch deren Konzentration anzugeben“.

Es bestehen folgende Gesetzmäßigkeiten:

1. Die Bildung fester Metallösungen ist von einer Härtezunahme begleitet.

2. Die Härteänderungen einer ununterbrochenen Reihe fester Metallösungen vom Typus $AB^{o-\infty}$ lassen sich durch eine kontinuierliche Kurve, die ein Maximum besitzt, ausdrücken (Fig. 32).

3. Bei den ununterbrochenen festen Lösungsreihen (isomorphen Gemischen) vom Typus $AB^{o-\infty}$ entspricht das Maximum des Härtediagramms dem Minimum der elektrischen Leitfähigkeit (Fig. 28).

4. Eine Veränderung der Zusammensetzung der festen Phase in den Grenzkonzentrationen der festen Lösungen vom Typus ABn_1-n_2 verursacht eine plötzliche Aenderung des Winkelkoeffizienten $\frac{dH}{dX}$ der Härtekurven (Fig. 33). H = Härte, X = Konzentration.

5. Konglomerate zeigen additive Härte (Fig. 34).

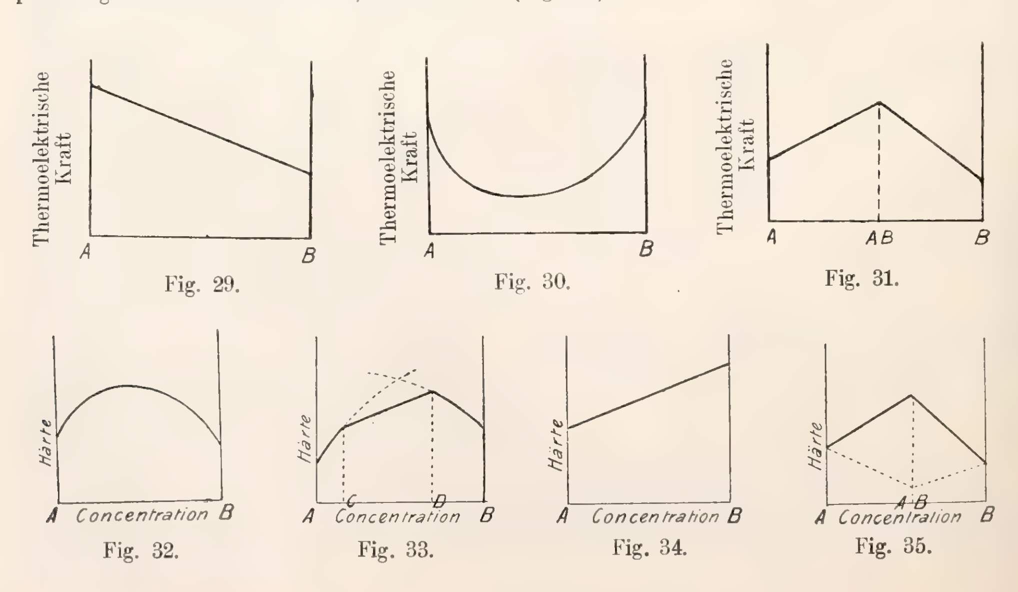


Fig. 29. Fig. 30. Fig. 31.

Fig. 32. Fig. 33. Fig. 34. Fig. 35.

6. Verbindungen machen sich durch Spitzen auf den Kurven bemerkbar. Sie sind härter oder weicher als die Komponenten (Fig. 35).

Figur 34 scheint im Widerspruch zu stehen mit den Beobachtungen von Ssaposhnikow und Roberts-Austen, die für Eutektika Härtemaxima fanden. Nach Kurnakow ist dies auf innere Spannungen zurückzuführen, die bei eutektischen Legierungen besonders leicht auftreten. Nach gehörigem Glühen verschwinden die Spannungen und die Legierung zeigt die Härte, die ihr nach dem Diagramm 34 zukommt.

Für den oben erwähnten Zusammenhang von Härte und Leitfähigkeit ist das Härten des Stahls ein gutes Beispiel. Die elektrische Leitfähigkeit wird dadurch beträchtlich vermindert, durch „Anlassen" kehrt sie wieder zur alten Stärke zurück.

g) Spezifische Dichte und spezifisches Volum der Legierungen (vgl. den Artikel „Dichte"). Ueber das spezifische Volum der Legierungen hat Maey Untersuchungen angestellt. Er findet

1. Im Fall von Konglomeraten und Mischkristallen wird das spezifische Volum durch die Formel

$$V(\text{Legierung}) = V(A) + b.pA$$

dargestellt (pA = Prozentgehalt an A).

2. Bei Bildung von Verbindungen treten deutliche Volumänderungen ein. Das Diagramm zerfällt in mehrere Teile, für deren jeden die obenstehende Formel gilt.

7. Spezielle Legierungssysteme. Nachdem im vorhergehenden die allgemeinen Typen der Erstarrung und des Aufbaus der Legierungen dargelegt worden sind, sollen nun noch einige spezielle Systeme behandelt werden, die besonderes Interesse in gewerblicher, metallurgischer oder wissenschaftlicher Beziehung besitzen.

Es sind dies folgende:

A. Gewerblich wichtige Legierungen.

1. Die Eisenkohlenstofflegierungen.
2. Bronzen, Messing und andere Kupferlegierungen.
3. Lagermetalle.
4. Leicht schmelzbare Legierungen.

B. Metallurgisch wichtige Legierungen.

1. Legierungen zwischen Metallen und Oxyden.
2. Legierungen zwischen Metallen und Sulfiden.
3. Legierungen von Sulfiden untereinander.
4. Legierungen von Arseniden untereinander.

C. Legierungen von wissenschaftlichem Interesse.

1. Magnetische Legierungen.
2. Pyrophore Legierungen.
3. Amalgame.
4. Hydride.

A1) Die Eisenkohlenstofflegierungen. Die Eisenkohlenstofflegierungen sind die wichtigsten von allen gewerblichen Legierungen, in historischer Hinsicht sind sie eng mit der Entwickelung der Metallographie verbunden und in theoretischer Beziehung ist das Eisenkohlenstoffdiagramm geradezu ein Musterbeispiel, das beinahe alle bei der Erstarrung metallischer Schmelzflüsse vorkommenden Erscheinungen vereinigt: Eutektika, Mischkristalle und Verbindungen, instabile Kristallarten, Polymorphie und Depression der Umwandlungspunkte.

Eine charakteristische Eigenschaft der Eisenkohlenstofflegierungen ist die ausgeprägte Neigung, zu instabilen Kristallarten zu erstarren und in diesem Zustand zu verharren, sowie die Beeinflußbarkeit in dieser Beziehung durch Zusatz bestimmter Stoffe.

Es empfiehlt sich deshalb für die systematische Behandlung eine Dreiteilung:

a) Das nicht vollkommen stabile System Eisen-Kohlenstoff.

b) Das vollkommen stabile System Eisen-Kohlenstoff.

c) Die Wirkung von Zusätzen auf das System Eisen-Kohlenstoff.

a) Das nicht vollkommen stabile System Eisen-Kohlenstoff. Das Diagramm Figur 36 stellt in seinen vollständig ausgezogenen und in den zum Teil ausge-

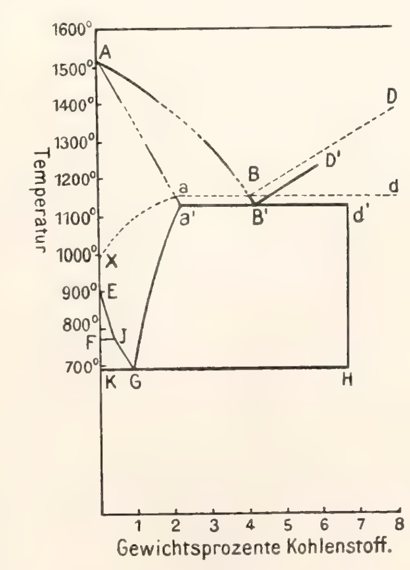


Fig. 36.

zogenen, zum Teil gestrichelten Linien die Kristallisationsvorgänge bei normaler Abkühlungsgeschwindigkeit dar, sofern der Kohlenstoffgehalt 4,2% (entsprechend B') nicht wesentlich überschreitet.

Man entnimmt aus dem Diagramm folgendes:

Das reine Eisen erleidet bei der Abkühlung im festen Zustand zwei Umwandlungen. Das aus der Schmelze abgeschiedene γ-Eisen wandelt sich um in β- und α-Eisen. Erst dieses ist magnetisch. Das α-Eisen führt als Gefügebestandteil den Namen Ferrit.

Mit steigendem Kohlenstoffgehalt findet die Erstarrung bei immer tieferen Temperaturen statt, es scheiden sich Mischkristalle aus (Martensit). Bei 4,2% Kohlenstoff ist das Eutektikum erreicht, es fallen gleichzeitig Mischkristalle und Kristalle der Verbindung Fe_3C (Cementit). Jenseits des Eutektikums findet zuerst Kristallisation von reinem Cementit statt, doch kann die Kurve nicht weit über 4,2% hinaus verfolgt werden, da dann der Cementit unbeständig zu werden beginnt.

Unterhalb der eutektischen Linie ist alles erstarrt. Im festen Zustand finden noch folgende Veränderungen statt:

Mit sinkender Temperatur nimmt die Löslichkeit des Cementits im Eisen ab, er kristallisiert längs der Kurve a'G aus den Mischkristallen aus.

Andererseits nimmt auch die Löslichkeit des Eisens ab, es scheidet sich längs der Linie EJG aus den Mischkristallen ab, von E bis J in der β-Form, die dann bei der Temperatur des Punktes F sich in die α-Form umwandelt, von J bis G direkt in der α-Form.

Die Abscheidung der β- und α-Form bei niedrigeren Temperaturen kann auch als Depression der Umwandlungspunkte aufgefaßt werden.

Die beiden Kurvenzüge treffen sich in dem Punkte G, der als richtiger eutektischer Punkt der festen Lösung Eisen-Cementit anzusehen ist. Das Eutektikum führt den Namen Perlit.

Die geschilderten Vorgänge finden nur bei langsamer Abkühlung statt. Durch rasche Abkühlung kann man den Martensit durch die Zerfallszone unzersetzt hindurchbringen in ein Gebiet so geringer Reaktionsgeschwindigkeit, daß diese an sich instabilen Zustände praktisch beständig sind.

Auf diesen Verhältnissen beruht das Härten des Stahls, das in der Bildung der harten Martensitkristalle besteht: durch Erhitzen über 710° bewirkt man die Umwandlung des Perlits in Martensit — „Anlassen" — und fixiert diesen Zustand dann durch rasches Abkühlen — „Abschrecken".

b) Das vollkommen stabile System Eisenkohlenstoff. Eine Reihe von Beobachtungen läßt darauf schließen, daß das behandelte System z. T. nicht ganz stabile Zustände darstellt. Besonders spricht hierfür die Erscheinung, daß durch längeres Erhitzen auf Rotglut ein Zerfall der Mischkristalle und des Cementits herbeigeführt wird. Das Eisen enthält nach der Abkühlung den Kohlenstoff in Form von Graphit und Temperkohle.

Diese neuen Verhältnisse werden durch die gestrichelten Linien des Diagramms dargestellt. Ihr genauer Verlauf konnte noch nicht experimentell festgelegt werden, da die Einstellung der entsprechenden Gleichgewichte sehr langsam erfolgt.

c) Die Wirkung der Zusätze zu den Eisen-Kohlenstofflegierungen. Außer Kohlenstoff enthalten die technischen Eisen und Stahlsorten meist noch andere Elemente: Schwefel, Phosphor, Silicium, Mangan, Nickel, Chrom, Wolfram, Molybdän, Vanadium.

Schwefel und Phosphor beeinflussen die Eigenschaften des Eisens in unerwünschter Weise und werden so weit wie möglich entfernt, die anderen Elemente werden absichtlich zugesetzt.

Durch die Zusätze wird die Lage der Kurven und die Ausdehnung der Diagrammfelder verändert: die Beständigkeit des Carbids wird vergrößert oder verringert, die Lage der Umwandlungs- und eutektischen Punkte wird verschoben, Unterkühlungen werden begünstigt. Endlich treten auch spezifische Wirkungen auf.

Die genannten Elemente erscheinen, wie erwähnt, vielfach als Gegenspieler, so Silicium und Mangan.

Silicium begünstigt den Zerfall des Cementits, Mangan erhöht seine Beständigkeit.

Petersen hat Untersuchungen über die Löslichkeitsverminderung des Kohlenstoffs im Eisen durch Silicium ausgeführt. Die Tabelle auf Seite 139 zeigt die Resultate.

Die Legierungen wurden längere Zeit auf den Schmelzpunkt erhitzt.

Man nahm sogar früher an, daß Graphitbildung ohne Silicium nicht möglich sei, doch ist diese Ansicht durch die Versuche von Wüst an reinen Eisen-Kohlenstofflegierungen widerlegt.

Siliciumhaltiges Eisen von entsprechendem Kohlenstoffgehalt wird also beim Erstarren zur Bildung von grauem graphithaltigen, manganhaltiges zur Bildung von weißem cementithaltigem Roheisen neigen.

Auch in den kohlenstoffärmeren Legierungen sind die beiden Elemente von Bedeutung und wirken sich entgegen.

Silicium erhöht den eutektischen Punkt

Tabelle 6.

Siliciumgehalt in %	Kohlenstoff in %	Erstarrungspunkt	Silicium %	Kohlenstoff %	Erstarrungspunkt
0	4,3	1130°	3,25	3,41	1187°
0,13	4,29	1138°	3,69	3,32	1197°
0,21	4,23	1131°	3,96	3,22	1205°
0,41	4,11	1152°	4,86	3,08	1210°
0,66	4,05	1155°	5,06	2,86	1215°
1,14	3,96	1160°	13,54	1,94	1233°
1,41	3,88	1175°	18,76	1,19	1240°
2,07	3,79	1185°	20,93	0,87	1255°
2,68	3,56	1185°			

der Mischkristalle und verkleinert so das Mischkristallfeld, Mangan erniedrigt den eutektischen Punkt und vergrößert so das Gebiet der festen Lösungen.

Bei den anderen Elementen, welche zur Erzeugung von „Spezialstählen" zugesetzt werden, sind die Wirkungen bei geringer Konzentration analog denen von Silicium und Mangan. Auch bei ihnen findet man den gegensätzlichen Einfluß: Nickel wirkt wie Mangan, Chrom und Wolfram wie Silicium. Bei höheren Konzentrationen treten spezifische neue Gefügebestandteile auf.

Die spezifische Wirkung der Spezialstahlzusätze ist eine doppelte: 1. Sie wirken härtend, wie gelöstes Eisencarbid, doch mit der Besonderheit, daß die Spezialstähle trotz ihrer Härte nicht spröde sind, wie die reinen Kohlenstoffstähle. Sie übertreffen diese an Festigkeit und in anderen mechanischen Eigenschaften.

2. Sie begünstigen in ganz enormem Maße die Unterkühlungen und die Beständigkeit der Mischkristalle. Die Unterkühlung hängt wesentlich von der Höhe der vorhergehenden Erhitzung ab, wie dies die Tabelle für die Umwandlung der Mischkristalle in Perlit zeigt.

Tabelle 7.

Erhitzungstemp.	Eintritt der Umwandl. beim Abkühlen
835°	713—716
1030	682—692
1220	635—643
1320	640—600

Besonders groß ist die Beständigkeit der Mischkristalle bei den quaternären Stählen, bei denen zwei Metalle zugesetzt werden z. B. bei den Chrom-Wolframstählen. Um sie hart zu erhalten, ist es nicht nötig sie abzuschrecken, sie gehen praktisch überhaupt nicht mehr in die perlitische Form über, sie sind „naturhart". Erhitzen auf 600°, das bei den gewöhnlichen Stählen sofort zum Verlust der Härte führt, ist bei ihnen ohne Wirkung. Man benutzt deshalb diese Stähle als Werkzeugstähle, sie können heiß laufen ohne ihre Härte zu verlieren. Man bezeichnet sie als „Schnelldrehstähle".

A2) Kupferlegierungen. Bronze und Messing. Nächst den Eisen-Kohlenstofflegierungen besitzen die Legierungen des Kupfers weitaus die größte Bedeutung. Sie sind Musterbeispiele dafür, wie durch geeignete Zusätze die Mängel eines reinen Metalls beseitigt und seine Anwendungsgebiete erweitert werden können.

Das reine Kupfer hat zwei für ein gewerblich zu verwendendes Metall sehr erhebliche Nachteile: es ist für viele Zwecke zu weich und es läßt sich nicht gießen. Wie schon in der Einleitung erwähnt wurde, entwickelt das Kupfer infolge des Oxyd- und Sulfidgehalts beim Schmelzen und Erstarren andauernd Gase, der Guß wird blasig. Durch Zusätze, welche den Sauerstoff binden, ihn aus der Schmelze ausscheiden oder wenigstens der Reaktion mit dem Schwefelkupfer entziehen, wird das Gasen verhindert. Außerdem wirken viele dieser Zusätze härtend und festigend. Man hat also im allgemeinen zwischen zwei Arten von Zusätzen zu unterscheiden: zwischen solchen, die nur in dem Maße zugesetzt werden, wie es zur Bindung des Sauerstoffs nötig ist, und den eigentlichen Legierungszusätzen, die in erheblichem Maße in das Endprodukt eingehen. Zu der ersten Gruppe gehören Phosphor und Silicium, zur zweiten hauptsächlich die Metalle Zinn und Zink, deren Verbindungen mit Kupfer als Bronze und Messing bezeichnet werden. Aluminium und Mangan werden bald nur als Sauerstoffbinder, bald auch als Legierungsmetalle verwendet.

a) Bronzen. Die Fähigkeit, das Kupfer zu härten, ist einer ganzen Reihe von Stoffen eigentümlich. Viele sogenannte Bronzen aus dem Altertum sind nichts anderes als ein durch Zinn, Arsen, Blei, Antimon, Eisen verunreinigtes Kupfer, von einer Zusammensetzung wie sie ungefähr das direkt aus den Erzen ausgeschmolzene Schwarzkupfer zeigt. Vielleicht sind sie auch in dieser Weise gewonnen worden. Vor allem aber besitzt das Zinn diese Fähigkeit des Härtens; es wird darin nur noch vom Aluminium übertroffen.

Aus dem Diagramm (Fig. 37) ist zunächst

eine Bestätigung der allgemeinen Regel über die Kombination von hoch und niedrig schmelzenden Metallen zu entnehmen: danach neigt das hochschmelzende Metall zur Mischkristallbildung, während sich das niedrigschmelzende rein ausscheidet. Durch die Ausscheidung einer reinen Komponente wird ein Eutektikum bedingt, im System Kupfer-Zinn liegt es ganz auf der Zinnseite bei 98% Zinn. Auf der Zinnseite treten drei feste Lösungen und die Verbindungen Cu_3Sn und CuSn (Bestandteil H) auf, welche zu Umwandlungspunkten (s. Abschnitt 5 Fig. 11 und 9) Anlaß geben. Interessante Erscheinungen zeigen die Bronzen, aus denen sich nach ihrer Zusammensetzung die festen Lösungen β und γ ausscheiden. Das Konzentrationsgebiet dieser Lösungen vermindert sich mit sinkender Temperatur. Bei langsamer Abkühlung sind dieselben unterhalb 500° völlig in die Lösung α und den neuen Bestandteil δ zerfallen. Durch rasche Abkühlung kann der ursprüngliche Zustand fixiert werden. Hieraus ergibt sich, daß gewisse Bronzen ebenso wie Stähle von bestimmter Zusammensetzung „angelassen" und „abgeschreckt" werden können, jedoch ist der Erfolg ein entgegengesetzter (Tabelle). Während die Stähle durch diese Behandlung gehärtet werden, wird bei den Bronzen mit über 10% Zinn, die durch Erhitzen auf dunkle Rotglut schmiedbar geworden sind, durch das Abschrecken in kaltem Wasser eine größere Geschmeidigkeit erhalten, so daß sie bearbeitet und geformt werden können. Die fertigen Stücke erhalten durch Anlassen und langsames Abkühlen ihre frühere Härte wieder.

Tabelle 8.

Nicht abgeschrecktes Metall	Zerreiß-festigkeit	Dehn-barkeit
bei 400°	25	1
„ 500°	25	0
	40	6

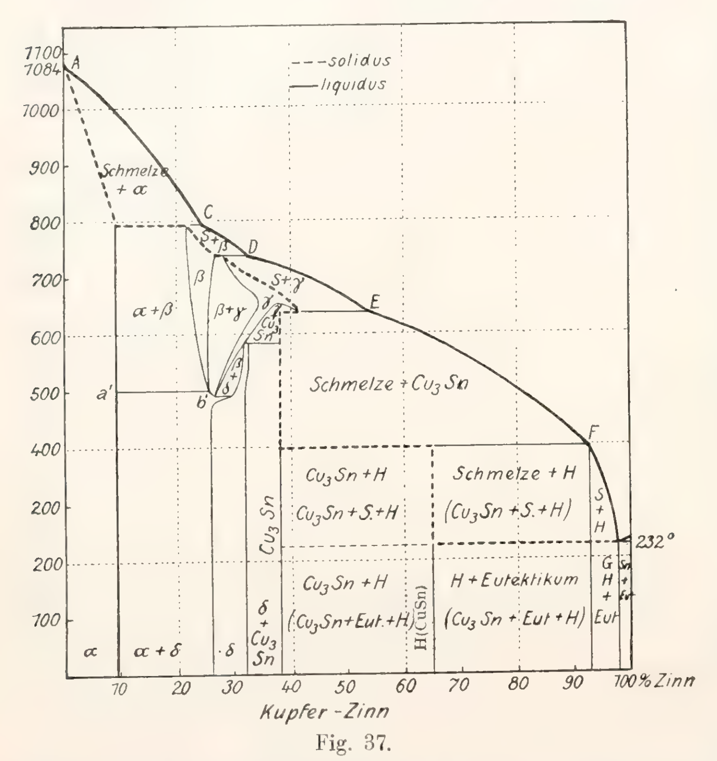


Fig. 37.

Die metallographische Begründung dieses Verhaltens ist in dem Ausbleiben oder Auftreten des harten und brüchigen Gefügebildners δ zu sehen. Der Einfluß von δ tritt auch in dem Diagramm (Fig. 38) deutlich hervor, das den Gang der Härte, der Dehnbarkeit und der Zerreißfestigkeit in Abhängigkeit von dem Zinngehalt und den Gefügebestandteilen darstellt: mit dem Auftreten von δ erreicht die Härte ein Maximum, Dehnbarkeit und Zerreißfestigkeit nähern sich dem Wert Null. Hierdurch erklärt sich auch, daß die gewerblich verwendeten Bronzen nie mehr als 30% Zinn enthalten, bei höherem Gehalt werden dieselben spröd und brüchig.

Das Diagramm (Fig. 39) zeigt die Anwendung der verschiedenen Methoden zur Ermittelung der Gefügebestandteile, die Uebereinstimmung in der Feststellung der Verbindung Cu_3Sn ist auffallend. Die Kurve der elektrischen Leitfähigkeit mit dem steilen Abfall auf der Kupferseite ergibt das Vorhandensein von festen Lösungen.

Je nach ihrer Bestimmung enthalten die Bronzen mehr oder weniger Zinn. Weniger als 10% enthalten die Bronzen für Münzen und Medaillen und die Kunstbronzen, mehr die Bronzen für Maschinenteile und die Lagermetalle, am meisten die Glockenbronzen. Den Kunstbronzen wird in der Regel Zink zugesetzt, wodurch die Gießbarkeit verbessert und der Preis vermindert wird.

Von anderen Zusätzen sind noch — neben den sauerstoffbindenden Phosphor, Mangan,

Silicium — Blei, Blei-Nickel und Aluminium anzuführen.

Durch den Bleizusatz werden die Bronzen zu vorzüglichen Lagermetallen, indem zu der Härte der gewöhnlichen Bronzen noch eine gewisse Plastizität hinzukommt. Der Nickelzusatz vermindert die den Bronzen eigentümliche Neigung zum Saigern.

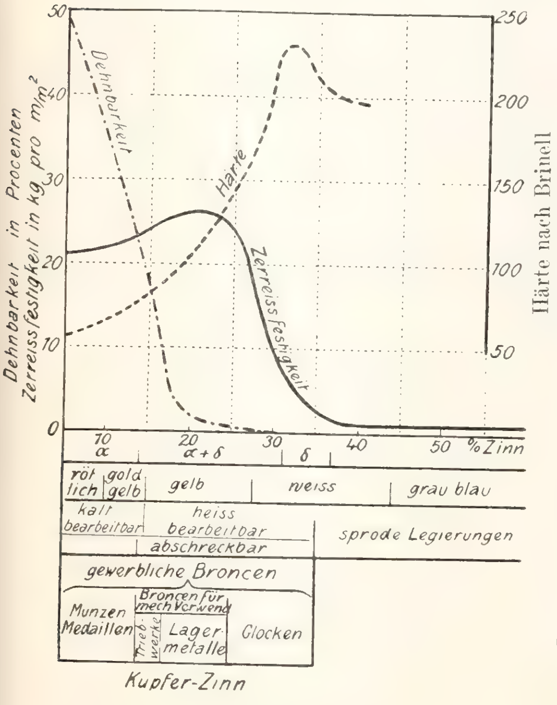


Fig. 38.

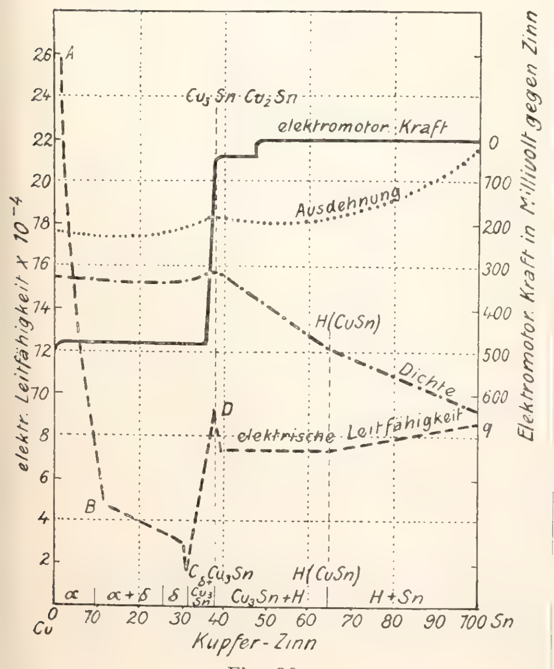


Fig. 39.

Die Aluminiumbronzen zeichnen sich durch große Härte aus, die, wie schon erwähnt, die der Zinnbronzen noch übertrifft. Sie werden für Zwecke verwendet, wo eine ganz besondere Härte und Festigkeit verlangt wird. Einer allgemeinen Einführung der Aluminiumbronzen anstelle der Zinnbronzen steht trotz dieser Ueberlegenheit in der Härte eine Reihe von Nachteilen, hauptsächlich in ihrem Verhalten beim Guß, entgegen.

b) Messing, Tombak, Hartlote. Neben den Bronzen sind die wichtigsten Legierungen des Kupfers die mit Zink, die in der Hauptsache als Messing bezeichnet werden. Zwischen den Bronzen und dem Messing besteht eine Reihe von Zwischenstufen, es gibt Bronzen mit so hohen Zinkgehalten, daß sie dem Messing näher stehen als den eigentlichen Bronzen.

Der Zusatz von Zink hat wie der von Zinn zunächst den Erfolg, das Kupfer gießbar zu machen, doch ist die Wirkung stärker als beim Zinn, wie schon bei den zinkhaltigen Bronzen erwähnt wurde. Außerdem aber werden auch die mechanischen Eigenschaften des Kupfers in ähnlicher Weise wie bei den Bronzen günstig beeinflußt.

Das Schmelzdiagramm (Fig. 40) zeigt das Verhalten von Zink-Kupferlegierungen bis zu einem Gehalt von 80% Zink. Im ganzen bilden sich aus Zink-Kupferschmelzen sechs feste Lösungen, aber keine Verbindungen, in dem angegebenen Konzentrationsbereich treten die festen Lösungen α, β und γ auf. Der Einfluß dieser Bestandteile auf die mechanischen Eigenschaften der Legierungen ist sehr verschieden, wie aus den Kurven der Figur 41 hervorgeht. Die Zerreißfestigkeit und besonders die Dehnbarkeit erreichen äußerst geringe Werte mit dem Auftreten des harten und brüchigen Bestandteils γ, also bei Zinkgehalten von über 50%. Diese Legierungen sind spröde und brüchig, technisch verwendete Legierungen enthalten daher nie mehr als 45 bis 50% Zink. Der Bestandteil β erhöht gemischt mit α die Zerreißfestigkeit auf ein Maximum, er vermindert die Dehnbarkeit. Die Legierungen von entsprechendem Gehalt (35 bis 45% Zink) können heiß bearbeitet, geschmiedet und gewalzt werden. Dies ist von großer Bedeutung, da beim Kaltwalzen das Messing federhart wird und vor jedem Durchgang angelassen werden muß. Der Bestandteil α zeigt eine etwas höhere Zerreißfestigkeit als das reine Kupfer und eine große Dehnbarkeit, die entsprechenden Legierungen können nur kalt geschmiedet und gewalzt werden.

Auch Zink-Kupferlegierungen können „angelassen“ und „abgeschreckt“ werden, es sind dies die Legierungen mit 36 bis 47% Zink. Wie das Diagramm (Fig. 40) zeigt, erstarren dieselben zunächst als homogene β-Lösungen. Bei fortschreitender Abküh-

lung scheiden sie die kupferreichere und zinkärmere Lösung α aus. Damit sind wie bei den Stählen und den Bronzen die Bedingungen für den Erfolg des Abschreckens gegeben, der Zerfall der homogenen Lösung β wird dadurch verhindert.

Im ganzen ergeben sich folgende Vorzüge des Messings gegenüber dem reinen Kupfer und den Bronzen: gegenüber beiden der geringere Preis besonders bei hohem Zinkgehalt, gegenüber den Bronzen die Ab-

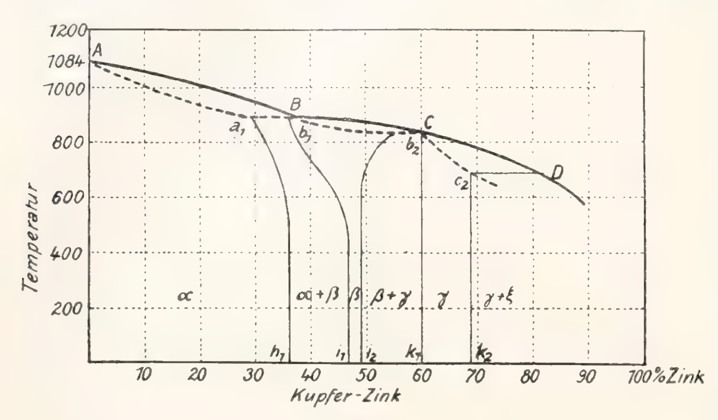


Fig. 40.

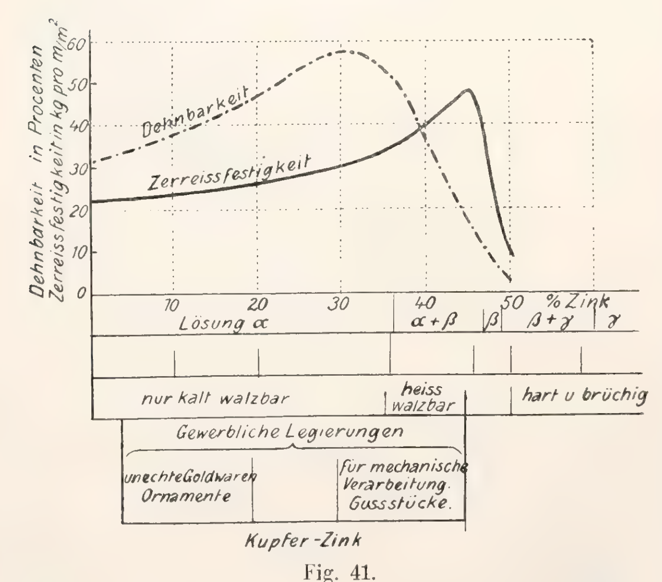


Fig. 41.

wesenheit von Saigerungserscheinungen, gegenüber dem reinen Kupfer die größere Härte und Festigkeit und die leichtere Bearbeitbarkeit. Es erklärt sich hieraus die vielseitige Verwendung des Messings für alle gewöhnlicheren Zwecke.

Bei Gehalten von weniger als 10% Zink besitzen die Zink-Kupferlegierungen eine rötliche Farbe und werden zur Herstellung von unechten Goldwaren (Tombak) verwendet.

Gußmessing wird je nach dem Zinkgehalt als Rot- oder Gelbguß bezeichnet.

Zu erwähnen ist noch die Verwendung von Zink-Kupferlegierungen zum Löten von Kupfer, Messing, Bronze, Eisen und anderen hochschmelzenden Metallen. Der Zinkgehalt richtet sich nach dem Schmelzpunkt der zu verbindenden Metalle. Man bezeichnet diese Lote als Hartlote im Gegensatz zu den aus Blei-Zinnlegierungen bestehenden Weichloten. In manchen Fällen wird Zinn oder Silber hinzugefügt (Silberschlaglote).

Wie zu den Bronzen werden auch zum Messing die verschiedenartigsten Zusätze gemacht — sauerstoffbindende und Legierungszusätze. Der Einfluß der Legierungszusätze auf die Konstitution ist beim Messing genau studiert worden und von großem Interesse. Solange eine bestimmte Grenze nicht überschritten ist, löst sich das zugesetzte Metall in den Bestandteilen α und β und beeinflußt die mechanischen Eigenschaften in äußerst günstiger Weise, bei höheren Gehalten tritt ein neuer Gefügebestandteil auf und die Legierung wird spröde und brüchig.

Die Wirkung des Zusatzes auf die mechanischen Eigenschaften kann zum Teil berechnet werden, wenn man annimmt, daß das zugesetzte Metall einer größeren oder kleineren Menge Zink äquivalent ist: die Legierung verhält sich wie eine reine Zink-Kupferlegierung von verschiedenem, größerem oder kleinerem Zink- oder Kupfergehalt. Dem Aluminium, um ein Beispiel anzuführen, kommt die Aequivalenzzahl 6 zu: man hat also für Messing mit 70% Cu 25% Zn 5% Al den „fiktiven" Gehalt von

$$\frac{25+(6\times5)}{70+25+(6\times5)}\times100 = 55/125\times100 = 44\% \text{ Zink}$$

und dementsprechend von 56% Kupfer. Das Diagramm (Fig. 41) zeigt, daß einem Gehalt von 25% Zink die reine feste Lösung, einem Gehalt von 44% ein Gemisch von α und β entspricht. Diese Berechnung wird durch den mikrographischen Befund bestätigt. Man kann demnach

erwarten, daß eine Cu-Zn-Al-Legierung von bestimmtem Kupfergehalt in ihren Eigenschaften einer reinen Cu-Zn-Legierung von entsprechendem „fiktiven" Kupfergehalt näher stehen wird als einer von gleichem. Die Richtigkeit dieser Vermutung wird durch die Tabelle erwiesen:

	Cu	Zn	Al
I. Aluminium-Messing	70,5	26,5	3
II. Gewöhnliches Messing	61,5	38,5	—
III. ,, ,,	70,5	29,5	—
	I	II	III
Zerreißfestigkeit	34	29	18
Zähigkeit	50	50	48
Elastizitätsgrenze	13	6,5	3

Außerdem aber ergibt sich aus der Tabelle, daß über die Werte des Messings von dem berechneten „fiktiven" Kupfergehalt hinaus eine Steigerung der Zerreißfestigkeit und der Elastizitätsgrenze stattgefunden hat. Hier liegt ein spezieller Einfluß des Aluminiums vor.

Im allgemeinen wird die Zerreißfestigkeit und besonders die Elastizitätsgrenze erhöht, die Dehnbarkeit vermindert, aber in geringerem Maße. Man kann also in dem Aluminium-Messing die Festigkeit des zinkreichen und die Dehnbarkeit des kupferreichen Messings vereinigen.

Aehnliches gilt für die Mangan-, Zinn- und die komplexen eisenhaltigen Zink-Kupferlegierungen.

A 3. Die Lagermetalle. Ein vorzügliches Beispiel für die Leistungsfähigkeit der Legierungen gegenüber den reinen Metallen liefern auch die Lagermetalle.

Ein gutes Lagermetall darf nicht zu weich sein, sonst klebt es am Wellenzapfen, es darf nicht zu hart sein, sonst vermag es sich der Form des Zapfens nicht anzupassen. Es soll also Eigenschaften vereinigen, Härte und Plastizität, die sich in einem homogenen Material nicht wohl vereinigt finden können.

Hier treten die Lagermetalle ein, binäre ternäre und quaternäre Legierungen, die immer der Bedingung entsprechen müssen, daß harte Kristalle in eine weiche Grundmasse (Eutektikum) eingelagert sind. Der Zapfen läuft dann auf den harten Kristallen, die aber infolge ihrer Einlagerung in das weiche Eutektikum jedem Druck nachzugeben vermögen.

Eine solche Legierung kann z. B. aus den Komponenten Zinn-Antimon-Blei hergestellt werden. Unter dem Mikroskop erkennt man deutlich Kristalle der Verbindung Sb-Sn, eingelagert in das ternäre Eutektikum.

Aehnliche Verhältnisse liegen bei den Letternmetallen vor, die einerseits genügend hart sein müssen, um die Form zu bewahren, andererseits etwas Nachgiebigkeit besitzen müssen, um nicht unter der Presse zu zerbrechen.

Das alte Letternmetall bestand aus Blei-Antimon: harte Antimon-Kristalle eingelagert in ein weiches Eutektikum. In neuerer Zeit wird noch etwas Zinn zugesetzt, das die Eigenschaften verbessert.

A 4. Leicht schmelzbare Legierungen. Um leicht schmelzbare Legierungen zu erhalten, bietet sich zunächst die Kombination der beiden Metalle mit den niedrigsten Schmelzpunkten, Zinn und Blei. Die tiefste Temperatur, die man so erreichen kann ist die des binären Eutektikums 182°. Um noch tiefer zu kommen, setzt man Wismut oder Cadmium oder beide zu, die leicht schmelzbaren Legierungen sind also ternär oder quaternär.

Im systematischen Teil wurde die Erstarrung des Systems Blei-Zinn-Wismut beschrieben. Das Eutektikum liegt bei 96°.

Die tiefste Temperatur wird durch die quaternäre Legierung Pb : Sn : Bi : Cd = 4:3:10:2 erreicht. Es ist dies die Woodsche Legierung. Sie schmilzt bei 65,5°.

Die leicht schmelzbaren Legierungen werden zum Löten, für Abgüsse und besonders für Bäder zum Anlassen und Abschrecken der Stähle verwendet.

B. Metallurgisch wichtige Legierungen. Wie schon in der Einleitung erwähnt wurde, vermögen sich die Metalle mit einer Reihe von Metalloiden oder vielmehr mit deren Metallverbindungen zu legieren, also mit Oxyden, Sulfiden, Arseniden, Phosphiden und Siliciden, ja, Sulfide und Arsenide legieren sich auch untereinander zu den von den Hüttenleuten als „Steine" und „Speisen" bezeichneten Produkten.

B 1. Legierungen von Oxyden und Metallen. Als Beispiel sei die Legierung Cu_2O-Cu angeführt (Fig. 42). Zur Auffindung derselben führte die Beobachtung, daß für Kupfer immer ein niedrigerer Erstarrungspunkt gefunden wurde, wenn die

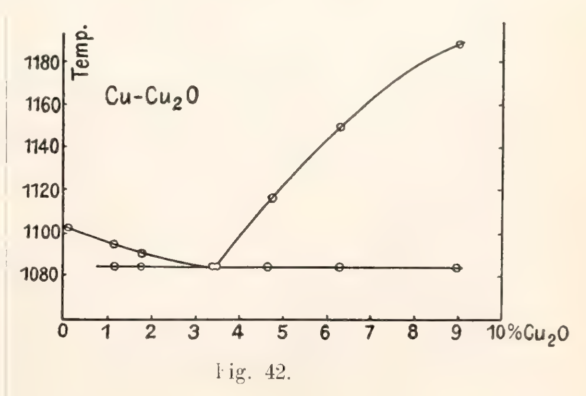
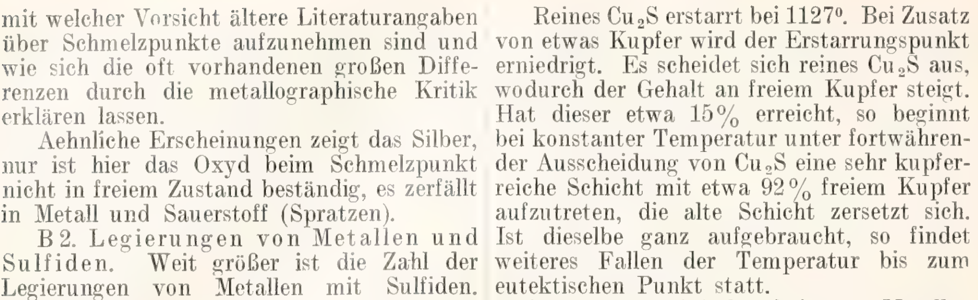


Fig. 42.

Erstarrung sich an der Luft vollzog, als wenn der Versuch in einer indifferenten Atmosphäre vorgenommen wurde. Das sich bildende Cu_2O drückt den Erstarrungspunkt herab. Bei 3,5% Cu_2O befindet sich ein Eutektikum. Diese und ähnliche Beobachtungen zeigen,



mit welcher Vorsicht ältere Literaturangaben über Schmelzpunkte aufzunehmen sind und wie sich die oft vorhandenen großen Differenzen durch die metallographische Kritik erklären lassen.

Aehnliche Erscheinungen zeigt das Silber, nur ist hier das Oxyd beim Schmelzpunkt nicht in freiem Zustand beständig, es zerfällt in Metall und Sauerstoff (Spratzen).

B 2. Legierungen von Metallen und Sulfiden. Weit größer ist die Zahl der Legierungen von Metallen mit Sulfiden. Diese spielen eine große Rolle bei den metallurgischen Prozessen z. B. bei der „Niederschlagsarbeit“ der Abscheidung von Metallen aus ihren Sulfiden durch Eisen. Die abgeschiedenen Metalle legieren sich mit den unzersetzten Sulfiden und dem neugebildeten Schwefeleisen, wodurch eine völlige Abscheidung verhindert wird.

Als Beispiel sei das System Pb-PbS angeführt. Das Diagramm würde ein völlig normaler Typus Va sein, wenn nicht das Eutektikum so nahe an der Bleiseite läge. Dadurch fällt der eutektische Punkt scheinbar mit dem Schmelzpunkt des Bleis zusammen.

Partielle Mischbarkeit im geschmolzenen Zustande findet man bei den Systemen Antimon-Antimonsulfür und Kupfer-Kupfersulfür.

Das Diagramm Figur 43 ($Cu = Cu_2S$) zeigt von der Mischungslücke abgesehen ein normales Eutektikum.

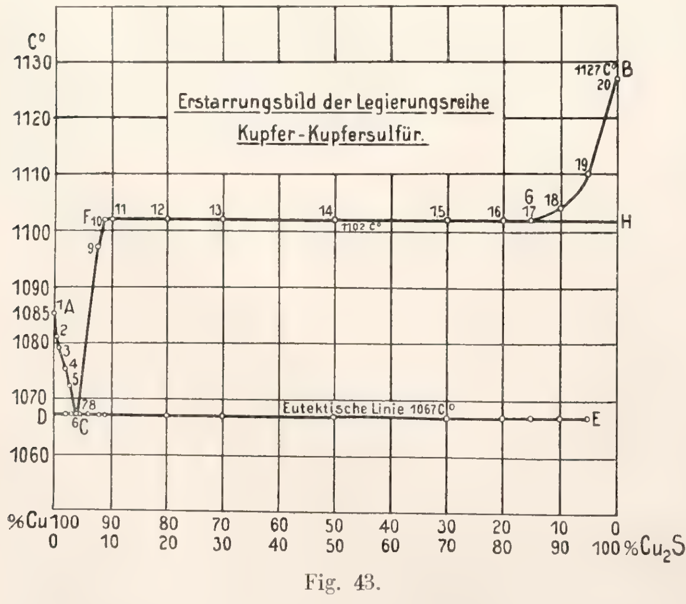


Fig. 43.

Die Mischungslücke hat zur Folge, daß bei der Erstarrung eines Cu_2S reichen Systems ein Haltepunkt auftritt. Die Vorgänge sind folgende:

Reines Cu_2S erstarrt bei 1127°. Bei Zusatz von etwas Kupfer wird der Erstarrungspunkt erniedrigt. Es scheidet sich reines Cu_2S aus, wodurch der Gehalt an freiem Kupfer steigt. Hat dieser etwa 15% erreicht, so beginnt bei konstanter Temperatur unter fortwährender Ausscheidung von Cu_2S eine sehr kupferreiche Schicht mit etwa 92% freiem Kupfer aufzutreten, die alte Schicht zersetzt sich. Ist dieselbe ganz aufgebraucht, so findet weiteres Fallen der Temperatur bis zum eutektischen Punkt statt.

Die partielle Mischbarkeit von Metallen und Sulfüren scheint die Regel zu sein. Sehr komplizierte Diagramme geben die Systeme Fe.FeS und Ni.NiS.

B 3. Legierungen zwischen Sulfiden. Diese Produkte entstehen immer bei der Verhüttung schwefelhaltiger Erze. Sie werden, wie schon erwähnt, als „Steine“ bezeichnet: Nickelstein, Bleistein, Kupferstein sind Legierungen der entsprechenden Sulfide mit Eisensulfür.

In den meisten Fällen sind die Diagramme sehr einfach: Reiner Typus Va. Dies gilt fast von allen Legierungen, bei denen Bleisulfid und Zinksulfid als Komponenten auftreten.

Beim System Cu_2S-Ag_2S besteht lückenlose Mischbarkeit im festen Zustand.

Der Kupferstein weist eine oder mehrere Verbindungen auf.

B 4. Arsenhaltige Legierungen. Beim reduzierenden Schmelzen arsenhaltiger Erze erhält man die „Speisen“. Besonders wichtig ist die Nickel- und Cobaltspeise, die bei der Gewinnung des Nickels aus arsenhaltigen Nickelerzen als Zwischenprodukt auftritt und im wesentlichen aus Eisen und Nickelarsenid besteht.

Die Speisen wurden hauptsächlich von Friedrich untersucht. Die Diagramme sind wegen der Flüchtigkeit des Arsens nicht vollständig.

Ein festes Eutektikum ohne Verbindungen und Mischkristalle wurde bei den Systemen Blei-Arsen, Silber-Arsen, Zink-Arsen festgestellt.

Im System Kupfer-Arsen treten zwei Verbindungen auf. Am genauesten untersucht sind die eigentlichen Speisebildner Arsen-Eisen und Arsen-Nickel. Hier wurden Verbindungen und Mischkristalle festgestellt.

C. Wissenschaftlich interessante

Legierungen. C1. Die magnetischen Legierungen. Zu den interessantesten Legierungen gehören die magnetischen Manganlegierungen. Durch Heusler wurde die interessante Tatsache entdeckt, daß das nicht magnetische Mangan mit den ebenfalls nichtmagnetischen Metallen Aluminium, Zinn, Arsen, Antimon und Wismut mit oder ohne Zusatz von Kupfer magnetische Legierungen zu bilden vermag. Eingehende Untersuchungen über den Gegenstand verdankt man Richarz.

Erhitzt man ein inniges Gemisch äquimolekularer Menge von Antimon und Mangan (Sb:Mn = 120:53), so tritt eine Reaktion ein. Nach dem Erkalten verhält sich die feingepulverte Legierung einem Magneten gegenüber genau wie Eisenpulver, man kann mit demselben den Verlauf der Kraftlinien zeigen.

Besonders genau studiert sind die Mangan-Aluminiumbronzen.

Wie die ferromagnetischen Metalle, Fe.Ni.Co, zeigen sie bei höherer Temperatur Umwandlungspunkte, bei denen der Magnetismus verschwindet. Auch zeigen sie die Erscheinung der Hysterese, in schwächerem oder stärkerem Maße, je nach der Schnelligkeit der Abkühlung. Langsam abgekühlte zeigen starke, abgeschreckte keine oder verschwindende Hysterese.

Heusler sieht den Träger des Magnetismus bei den Mangan-Aluminiumbronzen in der Verbindung $AlMe_3$, wo Me = Mangan ist, das teilweise isomorph durch Kupfer vertreten werden kann.

Die Magnetisierbarkeit wächst mit dem Mangangehalt und ist andererseits vom Aluminiumgehalt in der Weise abhängig, daß bei allen Legierungen bei etwa 13% ein Maximum erreicht wird. Dies entspricht ungefähr dem Aluminiumgehalt der Verbindung $AlMe_3$, da sich Mn (= 55) und Cu (= 63) in ihrem Atomgewicht nicht viel unterscheiden.

C2. Die pyrophoren Legierungen. Die pyrophoren Legierungen sind Cer- und Lanthan-Eisenlegierungen, von denen durch Reibung kleine Teilchen abgeschleudert werden, die sich an der Luft entzünden. Dieselben wurden von Auer v. Welsbach bei der elektrolytischen Darstellung der Edelerdmetalle mit Eisenkathoden entdeckt.

Das Maximum der Pyrophorität wird bei einem Eisengehalt von etwa 30% erreicht. Eisen kann zum Teil oder ganz durch Ni.Co. Mn ersetzt werden.

Während die reinen Erdmetalle sich an der Luft leicht oxydieren und weich sind, sind die Legierungen luftbeständig und hart.

Die pyrophoren Legierungen finden hauptsächlich Verwendung zur Herstellung von Leuchtgaszündern.

C3. Die Amalgame. Wie das Quecksilber unter den Metallen, so nehmen die Amalgame unter den Legierungen eine eigentümliche Stellung dadurch ein, daß sie — bei geringen Konzentrationen — bei gewöhnlicher Temperatur flüssig sind.

Fast alle Metalle lösen sich mehr oder weniger leicht in Quecksilber, teils direkt, teils auf geeigneten Umwegen. Ganz besonders leicht lösen sich die dem Quecksilber nahestehenden Metalle Zink und Kadmium, sehr wenig die Metalle der Eisengruppe Fe.Co.Ni und Platin.

Der Zustand der Metalle im Quecksilber wurde schon zu Anfang besprochen, sie lösen sich meist einatomig.

Die Erstarrung der flüssigen Gemische vollzieht sich nach denselben Regeln und Typen, wie bei den anderen Legierungen. Es existiert eine große Menge wohl definierter, in schönen Kristallen erhältlicher Verbindungen.

Von verschiedenen Forschern wurden Diagramme nach den im Vorhergehenden behandelten Methoden aufgenommen und daraus auf die Existenz einer Reihe von Verbindungen geschlossen.

Für die Systeme Na-Hg und K-Hg stellten Kurnakow und später Schüller vollständige Schmelzdiagramme auf: für Natrium sind die Verbindungen $NaHg_4$. $NaHg_2$. $Na_{12}Hg_{13}$. NaHg. Na_3Hg_2. Na_5Hg_2. Na_3Hg anzunehmen.

Puschin untersuchte die Schwermetallamalgame. Für Hg-Zn und Hg-Bi wurden eutektische Punkte gefunden. Cadmium, Blei, Zinn dagegen erniedrigen den Schmelzpunkt des Quecksilbers nicht.

Von besonderem Interesse ist das Ammoniumamalgam. Es wird durch Elektrolyse von Ammonsalzlösungen mit einer Quecksilberkathode hergestellt und erscheint als eine weiche Masse von der Farbe des Quecksilbers. Bei gewöhnlicher Temperatur entwickelt es Ammoniak und Wasserstoff in den stöchiometrischen Verhältnissen.

Weder Wasserstoff noch Ammoniak sind in Quecksilber merklich löslich, man ist also berechtigt, ein Ammoniumamalgam anzunehmen. Ein weiterer Beweis für den metallischen Charakter des Komplexes NH_4 wird durch die Ausfällung von Kupfer aus Kupfersulfat durch gekühltes Ammoniumamalgam geliefert.

C4. Hydrüre. Wenn der Wasserstoff, wie es lange Zeit allgemein geschah, zu den Metallen gerechnet wird, so müssen seine Verbindungen mit den Metallen als Legierungen bezeichnet werden.

Wasserstoff ist in einer Reihe von Metallen löslich, besonders in Pall dium und Platin. Palladium nimmt bei gewöhnlicher Temperatur und gewöhnlichem Druck 873 Volumina Wasserstoff auf, Platinschwamm 110 Volumina. Aus dem Palladiumwasserstoff läßt sich der größte Teil des Wasserstoffs im Vakuum bei gewöhnlicher Temperatur aus-

pumpen, der Rest erst bei der Temperatur des siedenden Schwefels. Die Aufnahme des Wasserstoffs ist von Wärmeentwickelung begleitet, sie beträgt 4370 cal pro 1 g H_2. Der Palladiumwasserstoff ist als feste Lösung von Wasserstoff in Palladium anzusehen.

Mit Cer und Lanthan vereinigt sich der Wasserstoff zu leicht dissoziierbaren Verbindungen, deren Dissoziationsdruck nicht nur von der Menge des gebundenen Wasserstoffs abhängig ist, sondern auch von Alter und Vorbehandlung der Präparate (feste Lösungen).

Dagegen bildet der Wasserstoff mit den Metallen der Alkalien und Erdalkalien chemische Verbindungen nach stöchiometrischen Verhältnissen, welche eine bestimmte Dampfspannung haben.

Moissan, dem man die Herstellung der Alkali- und Erdalkali-Hydrüre verdankt, hat diese auf ihre elektrische Leitfähigkeit untersucht; sie sind vollständige Nichtleiter. Er schließt aus seinen Versuchen, „daß der Wasserstoff mit den Metallen nicht vergleichbar ist und daß die Metallhydride den wirklichen Legierungen nicht gleichgestellt werden dürfen, mit denen sie weder das Aussehen noch die Eigenschaften gemein haben."

Dieser Schlußfolgerung Moissans ist entgegenzuhalten, daß doch andererseits die Verbindungen des Wasserstoffs mit Palladium und Platin als feste Lösungen anzusehen sind und daß sie in Aussehen und Eigenschaften (elektrische Leitfähigkeit) metallischen Charakter aufweisen. Es zeigt sich auch hier, daß, wie schon in der Einleitung dargelegt wurde, der Charakter einer Verbindung von den beiden Komponenten abhängig ist.

8. **Phasenregel** (vgl. auch den Artikel „Phasenlehre"). Bei der Vielgestaltigkeit der betrachteten Systeme wäre es gewiß angenehm, ein Prinzip zu besitzen, das unabhängig von der Eigenart des einzelnen Systems ganz allgemein ein Urteil über die zu erwartenden Erscheinungen gestattete. Ein solches Prinzip wurde von Willard Gibbs in der sogenannten Phasenregel aufgestellt, die an anderer Stelle in ausführlicher Weise behandelt ist. Die Phasenregel stellt eine Beziehung auf zwischen den Freiheiten (F) — Temperatur, Druck und Zusammensetzung — den „unabhängigen Bestandteilen" (B) und den „Phasen" (P) eines Systems. Sie findet ihren Ausdruck in der Formel:

$$F = B + 2 - P$$

Die Anwendung der Phasenregel auf Legierungen ergibt z. B. für das System Zink-Cadmium folgendes: Die Zahl der Bestandteile ist zwei, B = 2. Scheidet sich eine Kristallart aus, so hat man P = 3, da die Dampfphase immer als vorhanden angesehen werden muß. Die Formel ergibt somit eine Freiheit. Diese verschwindet, wenn die zweite Kristallart auftritt.

Auf solche Weise bringt die Phasenregel in allgemeingültiger Weise die Erfahrung zum Ausdruck, daß in dem betrachteten System die Zink- oder Cadmiumausscheidung bei verschiedenen Temperaturen je nach der Zusammensetzung der Schmelze stattfinden kann, daß aber das Eutektikum an eine bestimmte Temperatur gebunden ist.

Die Phasenregel ist rein formaler Natur, sie vermag über die inneren Zusammenhänge nichts auszusagen. Doch ist sie unter Umständen ein wichtiges kritisches Hilfsmittel, wenn es sich darum handelt, festzustellen, ob sich ein kompliziertes System im Gleichgewicht befindet, oder ob sich labile Bestandteile in demselben vorfinden. In dem Zwei-Komponentensystem Eisen-Kohlenstoff treten über ein großes Temperaturintervall nebeneinander außer der Gasphase Cementit, Graphit, Mischkristalle oder Cementit, Graphit, Ferrit auf. Die Phasenregel ergibt sofort, daß diese vier Phasen nur in einem einzigen Temperaturpunkt im Gleichgewicht sein können, daß also in dem Intervall einer der Bestandteile labil sein muß.

9. **Feste Lösungen. Verbindungsfähigkeit der Elemente. Elektronentheorie der metallischen Elektrizitätsleitung** (vgl. auch die Artikel „Lösungen" und „Elektrizitätsleitung"). In den vorhergehenden Ausführungen über die Erstarrung der Metallschmelzen trat immer wieder der Begriff des „Mischkristalls" oder der „festen Lösung" hervor. Die Erscheinung, daß sich aus den Schmelzflüssen außer den reinen Komponenten und den Verbindungen auch nicht stöchiometrische Gemische abscheiden können, ist von großer theoretischer und praktischer Bedeutung.

In der Existenz der festen Lösungen sind die wichtigsten technischen Eigenschaften der Legierungen begründet, ihre feine Abstufbarkeit und Wandelbarkeit, wofür besonders die Stähle und die Bronzen vielfältige Beispiele lieferten.

Durch die festen Lösungen werden in metallographischer Beziehung alle die Komplikationen des einfachen eutektischen Diagramms veranlaßt.

Durch die festen Lösungen kommt endlich die Lehre von den Legierungen in Berührung mit zwei Fragen von allgemeiner Bedeutung: mit der Frage nach der Verbindungsfähigkeit der Elemente und — durch ihr eigentümliches elektrisches Verhalten — mit der Frage nach dem Wesen der metallischen Elektrizitätsleitung und der Thermoelektrizität.

Für ein genaueres Studium dieser Fragen muß auf die angegebene Literatur und zum

Teil auf die Artikel „Lösungen" und „Elektronen" verwiesen werden, hier soll nur kurz die Frage behandelt werden, von welchen Faktoren die Fähigkeit der Metalle, feste Lösungen zu bilden, abhängig ist.

Die Bezeichnungen „Mischkristalle" und „feste Lösungen" für die Erscheinung des gemeinsamen Auskristallisierens sind offenbar nicht gleichwertig. Während der Ausdruck „Mischkristall" einfach die Tatsache feststellt und durch die Anlehnung an den Begriff des Isomorphismus eine kristallographische Erklärung nahelegt, bringt der Ausdruck „feste Lösung" eine ganz bestimmte Anschauung über die Natur der Mischung mit sich und stellt dieselbe in bewußte Analogie zu den flüssigen Lösungen.

Daß diese Anschauung begründet ist, wird durch ein reiches Tatsachenmaterial erwiesen, das zum großen Teil von van 't Hoff, dem Schöpfer des Begriffs, beigebracht wurde: Die festen Lösungen sind in allen wesentlichen Beziehungen den flüssigen gleichzustellen. Ihr Bereich ist gegenüber den flüssigen, wie schon erwähnt, beschränkt, doch scheint völlige Nichtmischbarkeit nach den neueren Forschungen nicht oder nur in seltenen Ausnahmen vorzukommen.

Tammann hat auf Grund zahlreicher Diagramme das Verhalten der Metallschmelzen bei der Erstarrung in einer Tabelle zusammengestellt und daraus allgemeine Gesichtspunkte abgeleitet, welche die Fähigkeit der Metalle zur Mischkristallbildung in Beziehung setzen zu ihrer Stellung im periodischen System und zu der Höhe der Erstarrungstemperatur.

Er spricht sich darüber aus wie folgt:

1. „Im allgemeinen gilt also die Regel, daß Elemente einer „natürlichen Gruppe", oder solcher Gruppen, welche in der Anordnung der Tabelle (s. Tabelle 1) einander benachbart sind (Cu.Ag.Au — Zn.Cd.Hg — usw.) die Fähigkeit besitzen miteinander Mischkristalle zu bilden. Vergleicht man diese Regel mit der von Mitscherlich über das Auftreten von Mischkristallen bei Verbindungen (Isomorphismus), so drängt sich uns die Vermutung auf, daß die Elemente, welche mit einander Mischkristalle bilden, einander ähnlich aufgebaut sind. Zu dieser Vermutung ist man auf Grund der Analogie im Bau des Spektrums der Elemente einer natürlichen Gruppe schon früher gelangt.

2. Während aus den binären Schmelzen die Metalle mit hohem Schmelzpunkt in der Regel nicht als reine Metalle, sondern als Mischkristalle kristallisieren, scheiden sich die Metalle mit niedrigen Schmelzpunkten in der Regel als praktisch reine Kristalle ab. Wenn die Schmelzpunkte beider Metalle hoch liegen, so tritt häufig lückenlose Mischbarkeit auf.

Bestimmender als die chemische Analogie auf die Fähigkeit der Metalle, Mischkristalle zu bilden, ist die Temperatur der Kristallisation.

Bei partieller Mischbarkeit lösen sich in dem Element mit höherem Schmelzpunkt mehr Atomprozente vom Element mit niedrigem Schmelzpunkt als umgekehrt."

Andererseits fand Tammann für die Bildung von chemischen Verbindungen folgende Regeln:

1. Die Elemente einer natürlichen Gruppe im engeren Sinn bilden untereinander keine Verbindungen.

2. Ein beliebiges Element bildet entweder mit allen Elementen einer natürlichen Gruppe im engeren Sinn Verbindungen oder es geht mit keinem der Gruppenglieder eine Verbindung ein.

Die Kombination der Regeln über die Fähigkeit zur Bildung einerseits von Mischkristallen, andererseits von Verbindungen läßt erwarten, daß sich Mischkristalle und Verbindungen gegenseitig ausschließen. Dies ist aber im allgemeinen nicht der Fall. Besonders bei höheren Temperaturen kristallisieren aus den Schmelzen sowohl Verbindungen als Mischkristalle.

Ein anderer interessanter Punkt ist die Valenz der Metalle in ihren Metallverbindungen: nur in wenigen Fällen findet eine Uebereinstimmung mit der „Salzvalenz" statt. Von 120 Verbindungen der erwähnten Tammannschen Tabelle ist dies nur bei 30 der Fall, von diesen sind 12 Antimon-, 6 Magnesiumverbindungen, also Verbindungen von Elementen, die ziemlich weit von der Mitte des periodischen Systems abstehen und sich den starken Salzbildnern nähern.

Zu denselben Schlüssen kommt Abegg auf Grund seiner Theorie der Elektrovalenz. Er unterscheidet zwischen „homöopolarer" und „heteropolarer" Affinität. Letztere besteht zwischen Elementen mit großem Horizontalabstand im periodischen System und führt zu salzartigen Verbindungen, die erstere besteht zwischen nahestehenden Elementen und befähigt zur Bildung von festen Lösungen und leicht zersetzlichen Verbindungen.

Die salzartigen Verbindungen werden durch wenige starke Valenzen von bestimmter Zahl zusammen gehalten, die schwachen Anlagerungsverbindungen durch viele schwache Valenzen von wechselnder Zahl.

Literatur. *Zusammenfassende Werke:* ***Heyn-Bauer,*** *Metallographie. Leipzig 1909.* — ***R. Ruer,*** *Metallographie. Halle 1906.* — ***P. Goerens,*** *Metallographie. Hamburg 1907.* — ***B. Roozeboom,*** *Die heterogenen Gleichgewichte vom Standpunkt der Phasenlehre. Braunschweig 1901.* — ***R. Schenck,*** *Physikalische Chemie der Metalle. Halle 1909.* — ***Cavalier,*** *Leçons sur les Alliages metalliques. Paris 1909.*

— ***Ledebur,*** *Die Legierungen. Berlin 1906.* ***G. Bruni,*** *Feste Lösungen und Isomorphismus. Leipzig 1908.* — ***Guillet,*** *Les aciers spéciaux.* — *Zeitschriftenliteratur:* ***G. Tammann,*** *Zt. El. Ch. Bd.* **14** *(1908), S. 789.* — ***W. Guertler,*** *Zt. anorg. Ch. Bd.* **51** *(1906), S. 397; ZS. ph. Ch. Bd.* **68** *(1910), S. 177; Phys. Zt. Bd.* **11** *(1910), S. 476.* — ***R. Abegg,*** *Zt. anorg. Ch. Bd.* **39** *(1904), S. 330.* — ***R. Schenck,*** *Ann. Phys. Bd.* **32** *(1906), S. 261.* — ***M. Herschkowitsch,*** *Zt. ph. Ch. Bd.* **27** *(1898), S. 123.* — ***N. Puschin,*** *Zt. anorg. Ch. Bd.* **56** *(1907), S. 1.* — ***E. Rudolfi,*** *Zt. anorg. Ch. Bd.* **67** *(1910), S. 65.* — ***Haken,*** *Ann. Phys. Bd.* **32** *(1910), S. 291.* — ***Kurnakow und Zemczuzny,*** *Zt. anorg. Ch. Bd.* **60** *(1908), S. 1.* — ***E. Maey,*** *Zt. ph. Ch. Bd.* **38** *(1901), S. 289.* — ***Heusler und Richarz,*** *Zt. anorg. Ch. Bd.* **61** *(1908), S. 265.*

A. Stirm.

Lehmann

Johann Gottlob.

Er war preußischer Bergrat in Berlin, wo er als Lehrer der Mineralogie und des Bergfachs wirkte. Seine literarische Tätigkeit erstreckte sich sowohl auf das chemische und mineralogische, als auch auf das bergmännische und geologische Gebiet. Die Kaiserin Katharina II. von Rußland berief ihn 1761 als Professor der Chemie und Direktor des kaiserlichen Museums nach St. Petersburg. In ihrem Auftrage unternahm er von 1765 an wissenschaftliche Reisen durch das russische Reich. Er starb bereits 1767 an den Folgen der Explosion einer mit Arsenik gefüllten Retorte. Ort und Zeit seiner Geburt sind nicht bekannt. Von seinen chemischen und mineralogischen Arbeiten ist besonders erwähnenswert Entwurf einer Mineralogie usw. (1758 1. und 1760 2. Auflage in Berlin erschienen); auf geologischem Gebiet Versuch einer Geschichte der Flötzgebirge (Berlin 1756), ein Werk, in dem er seine Ideen über Entstehung und Zusammensetzung der die feste Erdkruste bildenden Gesteine darlegte. Seine, von ihm der Bergmannsprache entlehnten Bezeichnungen, wie Zechstein, Kupferschiefer, rotes Totliegendes, sind dauernde Bestandteile der geologischen Nomenklatur geworden.

O. Marschall.

Leibeshöhle.

1. Geschichte des Leibeshöhlenproblems. 2. Die Leibeshöhle bei den Wirbeltieren: a) Anatomie. b) Die ontogenetische Entstehung der Leibeshöhle bei den Wirbeltieren. c) Das Kopfcoelom. d) Die Leibeshöhle bei Amphioxus e) Der phyletische Ursprung der Leibeshöhle bei den Wirbeltieren. 3. Die Leibeshöhle bei den wirbellosen Tieren: a) Plathelminthen, Rotatorien und Nemertinen. b) Nemathelminthen. c) Chaetognathen. d) Anneliden. e) Enteropneusten. f) Bryozoen und Brachiopoden. g) Arthropoden. h) Mollusken. i) Echinodermen. k) Tunicaten. 4. Der phyletische Ursprung der sekundären Leibeshöhle.

1. Geschichte des Leibeshöhlenproblems. Beim Menschen und bei den Wirbeltieren liegt der Darm in einer Höhle des Körpers, der Bauchhöhle, welche normalerweise durch die Eingeweide fast ganz ausgefüllt ist, aber in manchen Krankheitsfällen durch Ansammlung einer großen Flüssigkeitsmenge aufgetrieben wird. Bei denjenigen Wirbeltieren, welche ein Zwerchfell besitzen, also bei den Säugetieren, liegen die Lungen in einem ähnlichen Raum, in der Brusthöhle, welche ebenfalls in Krankheitsfällen eine große Flüssigkeitsmenge ausscheidet, so daß die Lungen zusammengedrückt werden. Auch der Herzbeutel wird in krankhaften Zuständen der Sitz einer Flüssigkeitsansammlung. Die Zusammengehörigkeit der Bauchhöhle, der Brusthöhle und des Herzbeutels ist also den Ärzten und Anatomen seit Jahrhunderten bekannt; man faßte diese Räume unter dem Namen der serösen Höhlen zusammen. Die Auskleidungen dieser Höhlen nannte man seröse Häute: das Bauchfell oder Peritoneum, das Brustfell oder die Pleura und den Herzbeutel oder das Pericardium.

Die vergleichend-anatomische Betrachtung zeigte, daß bei allen Wirbeltieren, welche noch kein Zwerchfell aber schon Lungen besitzen (also bei den Dipnoern, Amphibien, Reptilien und Vögeln) die Lungen in der Bauchhöhle liegen, woraus sich ergibt, daß die Brusthöhle der Säugetiere ein abgetrennter Teil der Bauchhöhle ist.

Im neunzehnten Jahrhundert erkannte man aus entwicklungsgeschichtlichen Untersuchungen, daß nicht allein die Bauchhöhle und die Brusthöhle, sondern auch der Herzbeutel einen gleichartigen Ursprung haben, indem sie alle aus der embryonalen Leibeshöhle, aus dem einheitlichen Hohlraum zwischen den Seitenplatten entstehen (Fig. 12 u. 13).

Bei den Wirbeltieren umfaßt also der Begriff der Leibeshöhle oder des Coeloms die in embryologischer, histologischer und pathologischer Hinsicht zusammengehörigen Hohlräume: die Bauchhöhle, die Brusthöhle und die Herzbeutelhöhle.

Da die Anatomie der Menschen und der Wirbeltiere für die ganze vergleichende Anatomie den Ausgangspunkt bildete, erwartete man, auch bei den wirbellosen Tieren ähnliche Verhältnisse zu finden und war daher geneigt, jeden Hohlraum zwischen der Darmwand und der Körperwand als Leibeshöhle zu bezeichnen. Man dachte, daß die Leibeshöhlen der verschiedensten Tiertypen sich morphologisch entsprechen und versuchte ihre Entstehung in einheitlicher Weise zu erklären,

indem man sie als abgetrennte Ausstülpungen des Darmes ansah.

Schon im Jahre 1848 sprach Leuckart die Meinung aus, daß die Darmdivertikel der Coelenteraten (speziell der Anthozoen) mit der Leibeshöhle der höheren Tiere zu vergleichen wären. Diese Ansicht fand um so mehr Zustimmung, als Alexander Agassiz im Jahre 1864 die Beobachtung machte, daß bei den Echinodermen die Leibeshöhle und das Wassergefäßsystem aus Ausstülpungen des Darmkanals sich entwickeln (vgl. Fig. 21) und ähnliche Bildungsweisen der Leibeshöhle von Metschnikoff (1869) bei der Larve des Balanoglossus, und von Kowalewski (1871) bei Sagitta gefunden wurden (vgl. Fig. 1). Ray Lankaster sprach sich also im Jahre 1875 in dem Sinne aus, daß die Leibeshöhle aller Tiere morphologisch dasselbe Gebilde sei und immer von dem Darmkanal durch Bildung von Ausstülpungen ihren Ursprung genommen habe.

Dagegen stellte der englische Morphologe Huxley in demselben Jahre eine neue Theorie auf, indem er betonte, daß die Leibeshöhle der Tiere nicht in allen Fällen dasselbe Gebilde sei. Er unterscheidet ein Enterocoel, ein Schizocoel und ein Epicoel. Die Leibeshöhle erster Art, das Enterocoel, stamme von Ausstülpungen des Urdarms und sei bei den Echinodermen, bei Sagitta und bei Balanoglossus nachgewiesen. Aber bei manchen Tieren sei die Leibeshöhle als Spaltraum im Mesoderm aufzufassen und daher als Schizocoel zu bezeichnen. Letztere Art der Leibeshöhle liege bei den Mollusken und den Anneliden vor. Eine Höhle dritter Art, welche er Epicoel nannte, sei durch Einstülpung von außen entstanden, wofür als Beispiel der Perithoracalraum der Tunicaten angeführt wird.

In umfassender Weise wurde dann das Problem im Jahre 1882 von den Gebrüdern Oskar und Richard Hertwig behandelt. In ihrer Coelomtheorie suchten sie darzulegen, daß der Unterschied der Leibeshöhle für die ganze Auffassung der Organisation der Tiere von grundlegender Bedeutung sei und insbesondere mit Unterschieden in der Beschaffenheit der Muskulatur und des Exkretionsapparates in der engsten Beziehung stehe. Sie gingen von ihren Studien an Coelenteraten aus, bei welchen sie zwei Typen der Muskulatur unterschieden: 1. die epitheliale Muskulatur, wie sie sich bei den meisten Coelenteraten findet, und 2. die mesenchymatische Muskulatur, welche den Rippenquallen (Ctenophoren) zukommt. Während die epitheliale Muskulatur von den epithelialen Keimblättern aus entstanden sei, und daher eine gewisse Regelmäßigkeit im Verlauf der Muskelfasern aufweise, sei die mesenchymatische Muskulatur aus einem Mesenchym entstanden, d. h. aus einzelnen Zellen, welche in die zwischen den beiden primären Keimblättern befindliche Gallerte hineingewandert waren, woraus ein unregelmäßiger und scheinbar ungeordneter Verlauf der Muskelfasern sich ergibt.

Die Gebrüder Hertwig setzten die embryologischen und histologischen Beobachtungen in Beziehung zueinander, indem sie darlegten, daß denjenigen Tieren, welche ein Enterocoel besitzen, bei welchen also die Leibeshöhle vom Darm aus gebildet wurde, eine epitheliale Muskulatur zukommt, während diejenigen Tiere, welche ein Schizocoel (Pseudocoel) besitzen, bei welchen also die Leibeshöhle als Spaltraum entstand, durch eine mesenchymatische Muskulatur charakterisiert sind.

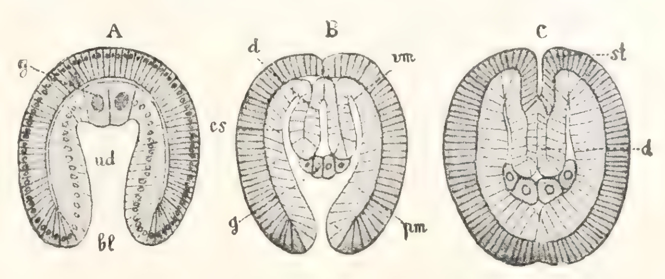


Fig. 1. Drei Entwickelungsstufen des Pfeilwurms Sagitta. Nach O. Hertwig aus Langs Lehrbuch. Die erste Figur zeigt die Gastrula, die zweite die Ausstülpungen am Urdarm, aus welchen die beiden Coelomsäcke hervorgehen. bl Blastoporus oder Urmund; ud Urdarm; g Urgeschlechtszellen; vm äußeres und pm inneres Blatt des Mesoderms; cs Ceolomsack oder Anlage der Leibeshöhle; d Mitteldarm; st Vorderdarm.

Die Gebrüder Hertwig unterscheiden daher zwei Organisationstypen, erstens die Pseudocoelier und zweitens die Enterocoelier. Bei den ersten ist die Leibeshöhle ein Spaltraum zwischen den beiden Keimblättern, ein Schizocoel oder, was damit gleichbedeutend ist, ein Rest des Blastocoels der Blastula; sodann haben die Pseudocoelier eine mesenchymatische Muskulatur, und ihre Exkretionsorgane sind Protonephridien.[1]) Die Geschlechtsorgane

[1]) Die Protonephridien sind Nierenkanälchen, welche mit sogenannten Wimpertrichtern beginnen, die nicht von der Leibeshöhle ausgehen, sondern durch eine Zelle abgeschlossen sind, von der eine flammenartige Wimper in den Trichter hineinhängt (Fig. 2).

sind gegen die Leibeshöhle abgeschlossen, so daß die Ausfuhr der Geschlechtsprodukte ohne Beziehung zur Leibeshöhle vor sich geht (Fig. 17). Zu diesen Pseudocoeliern rechnen die Gebrüder Hertwig die Plattwürmer, Rotatorien, Nemertinen, Mollusken und Bryozoen.

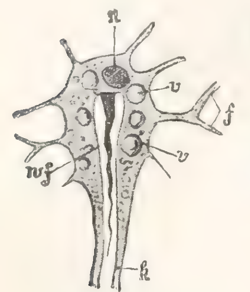


Fig. 2. Wimpertrichter eines Strudelwurms. Nach R. Hertwig. n Kern der Zelle. v Vakuolen in der Zelle. f Fortsätze der Zelle. wf Wimperflamme. k Kanälchen.

Die Enterocoelier sind nach der Theorie der Gebrüder Hertwig durch folgende wichtige Eigenschaften charakterisiert: Die Leibeshöhle wird embryologisch durch abgeschnürte Teile des Urdarmes gebildet oder ist stammesgeschichtlich auf solche zurückzuführen; sie hat daher eine eigene Wand, eine epitheliale Begrenzung. Die Muskulatur dieser Tiere hat den Charakter einer epithelialen Muskulatur. Die Exkretionsorgane (Nephridien) stehen mit der Leibeshöhle in direktem Zusammenhang, indem sie in der Leibeshöhle mit offenen Trichtern beginnen (Fig. 3). Die Geschlechts-

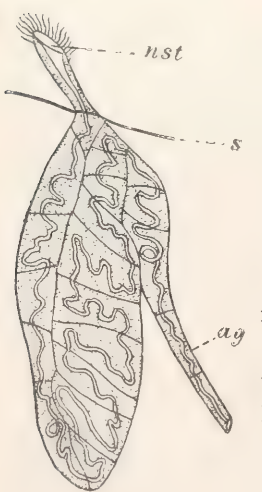


Fig. 3. Nephridium des oligochäten Borstenwurmes Tachydrilus sphagnetorum. Nach Michaelsen aus Meisenheimer Excretionsorgane. nst Trichter (Nephrostom). s Scheidewand der Segmenthöhlen (Dissepiment). ag Ausführungsgang.

organe stehen zuweilen ebenfalls in naher Beziehung zur Leibeshöhle, indem wenigstens in manchen Fällen die Gonaden aus dem Epithel der Leibeshöhle ihren Ursprung nehmen, und die reifenden Geschlechtszellen meistens in die Leibeshöhle fallen und von hier durch die Exkretionsorgane oder durch besondere Ausführungsgänge entleert werden. Zu den Enterocoeliern rechneten die Gebrüder Hertwig die Chaetognathen, Nematoden, Anneliden, Enteropneusten, Brachiopoden, Arthropoden, Echinodermen, Tunicaten und Wirbeltiere.

Das Blutgefäßsystem wurde in der Coelomtheorie der Gebrüder Hertwig mit dem Schizocoel in Verbindung gebracht; es habe also bei den Pseudocoeliern denselben Ursprung wie die Leibeshöhle, stelle aber bei den Enterocoeliern ein System von Röhren dar, welche sich in dem Mesenchym des Körpers ausbilden und ursprünglich gegen die Leibeshöhle (das Enterocoel) abgeschlossen sind. Im Jahre 1893 entwickelte Bütschli in eingehender Weise die Theorie, daß das Blutgefäßsystem von dem Pseudocoel oder Schizocoel herzuleiten ist.

Einen neuen Gedanken brachte die Gonocoeltheorie. Sie wurde schon im Jahre 1878 von Hatschek ausgesprochen, welcher in seiner Trochophoratheorie die Leibeshöhle der Anneliden der Geschlechtsdrüse der Rotatorien homolog setzte und darauf hinwies, daß die sekundäre Leibeshöhle sich verhält wie die „Höhle der Geschlechtsdrüse der niedrigeren Formen". Die Gonocoeltheorie wurde dann hauptsächlich von R. S. Bergh (1885), Eduard Meyer (1890), Goodrich (1895) und Arnold Lang (1892 u. 1903) weiter ausgebaut. Die echte Leibeshöhle, welche die Gebrüder Hertwig von Ausstülpungen des Urdarms herleiteten, wird also auf einen ganz anderen Ursprung, nämlich auf die Höhlen der Geschlechtsdrüsen (Gonaden) zurückgeführt. Zugunsten dieser Theorie spricht vor allem die Tatsache, daß die Geschlechtsprodukte in manchen Fällen an der Wand der Leibeshöhle entstehen und in die Leibeshöhle fallen. Ferner haben mehrere Autoren betont, daß die Geschlechtsorgane bei niederen Würmern oft jederseits eine Reihe von Säckchen bilden, so daß man sofort das Bild einer segmentierten Leibeshöhle erhält, wenn man sich den Hohlraum dieser Säckchen erweitert und ausgedehnt vorstellt (vgl. Fig. 22 u. 23).

Im Jahre 1898 gab H. E. Ziegler ein Referat über den Stand der Coelomfrage. Er übernahm von den früheren Autoren den Gedanken, daß zwei Arten von Leibeshöhlen streng zu unterscheiden sind, welche die Gebrüder Hertwig und vor ihnen schon Huxley als Enterocoel und Schizocoel bezeichnet hatten. Ziegler benutzt dafür die Namen primäre Leibeshöhle (Protocoel) und sekundäre Leibeshöhle (Deuterocoel), weil diese Ausdrücke über die Frage des stammesgeschichtlichen und entwickelungsgeschichtlichen Ursprungs der Höhlen keine Theorie

enthalten.[1]) Er läßt in bezug auf den Ursprung der sekundären Leibeshöhle drei Möglichkeiten offen: entweder ist sie vom Urdarm aus entstanden, demnach ein Enterocoel, oder sie stellt eine erweiterte Gonadenhöhle dar, und kann Gonocoel genannt werden, oder sie hat ihrem Ursprung nach schon den Charakter eines Exkretionsorganes und läßt sich als Nephrocoel bezeichnen.[2]) Im Gegensatz zu den Gebrüdern Hertwig bestreitet er den diagnostischen Wert des Gegensatzes der epithelialen und der mesenchymatischen Muskulatur und betont insbesondere, daß die Mollusken, welche nach den Gebrüdern Hertwig eine typische mesenchymatische Muskulatur besitzen, doch in ihrem Herzbeutel eine typische sekundäre Leibeshöhle haben (Fig. 4). Ziegler legt auch an die embryologischen Beobachtungen

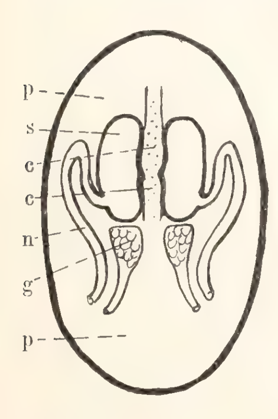


Fig. 4. Schema der Leibeshöhle der Mollusken (speziell der Muscheln). p primäre Leibeshöhle (Protocoel, Schizocoel); s sekundäre Leibeshöhle (Deuterocoel, Coelom), repräsentiert durch die Pericardialhöhle (den Herzbeutel); n Nierenschlauch (Bojanussches Organ); g Gonade (Geschlechtsdrüse); c Herz.

eine strengere Kritik an, indem er die Meinung vertritt, daß man nicht berechtigt sei, die hohle Entstehung stets als die stammesgeschichtlich ältere anzusehen, wenn dasselbe Organ bei nahe verwandten Tieren bald hohl, bald solid angelegt wird. Die hohle Anlage kann aus einer soliden hervorgegangen sein, ebenso wie aus einer hohlen Anlage eine solide werden kann.

Unter den Darstellungen der neuen Zeit muß noch die von Arnold Lang (1903) aufgestellte „Trophocoeltheorie“ genannt werden. In einer umfangreichen Schrift wird der Gedanke ausgeführt, daß die segmentierte Leibeshöhle der Anneliden und Arthropoden durch eine Erweiterung der Gonadenreihen von Plathelminthen entstanden sei (vgl. Fig. 22 u. 23). Ferner wird das Blutgefäßsystem der genannten Tiere aus der primären Leibeshöhle abgeleitet. Indem das Coelom, welches in den beiden Mesodermstreifen entsteht, sich um den Darm herum ausdehnt, umfaßt es über dem Darm und unter dem Darm einen Teil der primären Leibeshöhle, so daß zwei Gefäße entstehen, von welchen das eine über dem Darm im oberen Mesenterium, das andere unter dem Darm im unteren Mesenterium gelegen ist (Fig. 6).

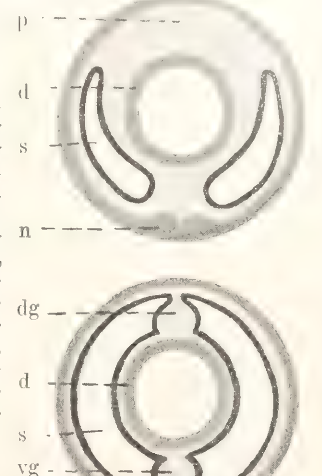


Fig. 5 und 6. Querschnitte durch Larven von Borstenwürmern (Chaetopoden) in zwei Stadien. Nach A. Lang. p primäre Leibeshöhle (Protocoel, Schizocoel), s sekundäre Leibeshöhle (Deuterocoel, Coelom), d Darm, n Anlage des Bauchmarks, dg dorsales Gefäß, vg ventrales Gefäß.

Vom embryologischen Standpunkt aus ist das Leibeshöhlenproblem vor kurzem in dem Lehrbuch von Korschelt und Heider (1910) ausführlich behandelt worden. Die Autoren gehen auf alle die genannten Theorien ein und kommen schließlich zu einer Auffassung, welche der Enterocoeltheorie am nächsten steht. Bei denjenigen Tieren, welche von Grobben als Deuterostomia zusammengefaßt wurden, also bei den Enteropneusten, Echinodermen, Chaetognathen und Chordaten sind sie geneigt, die Enterocoelbildung für den ursprünglichen Vorgang zu halten. Bei denjenigen wirbellosen Tieren, welche von Hatschek als Zygoneura, von Grobben als Protostomia bezeichnet wurden, nämlich bei den Anneliden, Arthropoden, Mollusken und Molluskoideen kann ein ektodermales und ein entodermales Mesoderm unterschieden werden; das erste wird zu Bindegewebe und Muskulatur verbraucht, das letztere liefert die Mesodermstreifen mit den Gonaden und außerdem Muskulatur und Mesenchym. Das entodermale Mesoderm entsteht bei den Anneliden und den Mollusken ontogenetisch von zwei

[1]) Die Ausdrücke primäre und sekundäre Leibeshöhle sind schon von früheren Autoren (Grobben u. a.) gebraucht worden.

[2]) Eine genauere Darstellung dieser drei Möglichkeiten wird in dem letzten Abschnitt dieses Aufsatzes gegeben, welcher den phyletischen Ursprung der sekundären Leibeshöhle betrifft.

Urmesodermzellen aus, welche wahrscheinlich den Urgenitalzellen der niederen Würmer entsprechen (Teloblastische Mesodermstreifbildung). Diese Urmesodermzellen stammen in der Furchung von Urentodermzellen ab. Man kann also eine Urmesodermzelle als ein Urdarmdivertikel betrachten, welches durch sekundäre Vereinfachung des Entwickelungsprozesses auf eine einzige Zelle reduziert worden ist (Fig. 7). Durch diese Auffassung ergibt sich also die Möglichkeit, die Enterocoeltheorie auch auf solche Tierklassen anzuwenden, welche Urmesodermzellen besitzen und in der Ontogenie keine Spur einer Enterocoelbildung erkennen lassen.

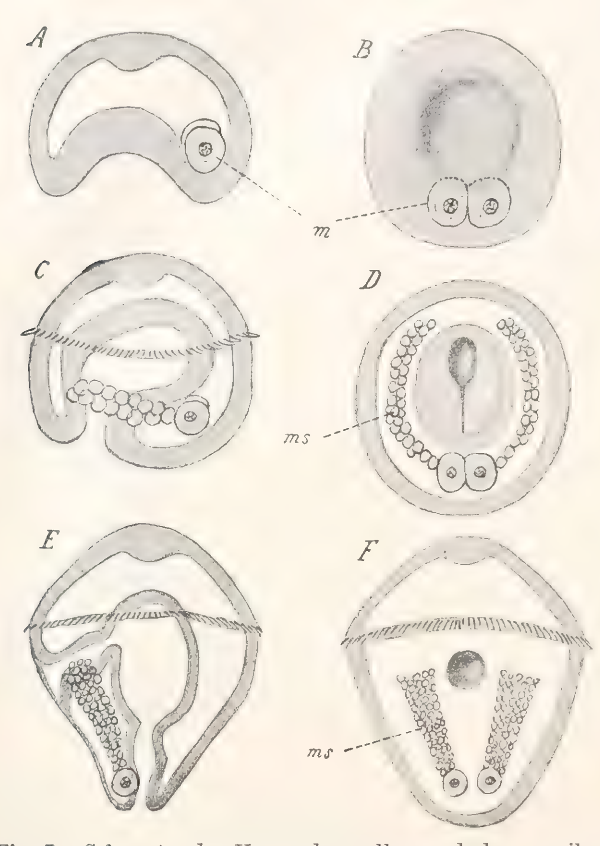


Fig. 7. Schemata der Urmesodermzellen und der von ihnen ausgehenden Bildung der Mesodermstreifen bei Anneliden. Nach Korschelt und Heider. A Gastrula von der Seite gesehen, mit 2 Urmesodermzellen (m). C Aeltere Gastrula mit Mesodermstreifen (ms). E Trochophora-Larve mit Mesodermstreifen (ms). Die Figuren B, D und F stellen dieselben Larven dar, von der Seite des Mundes betrachtet.

Ich bespreche nun zunächst die tatsächlichen Verhältnisse bei den Wirbeltieren und den Wirbellosen und komme erst in dem Schlußkapitel auf die theoretische Streitfrage des phyletischen Ursprungs der Leibeshöhle zurück.[1])

2. Die Leibeshöhle der Wirbeltiere. Wie schon gesagt wurde, stellen bei den Wirbeltieren die sogenannten serösen Höhlen die Leibeshöhle dar: 1. die Bauchhöhle (Cavum abdominis, Cavum peritonei), ausgekleidet von dem Bauchfell (Peritoneum), 2. jederseits ein Brustfellsack (Cavitas pleurae), ausgekleidet von dem Brustfell, der Pleura, 3. der Herzbeutel, die Pericardialhöhle (Cavum pericardii), ausgekleidet von dem Herzbeutelepithel, Pericardialepithel. Die Brusthöhle ist ein abgetrennter Teil der Bauchhöhle; die Trennung ist stammesgeschichtlich erst bei den Säugetieren entstanden und vollzieht sich auch ontogenetisch bei den Säugetierembryonen erst mit der Entwickelung des Zwerchfells.

2a) Anatomie. Beim Menschen und bei den Säugetieren sind die anatomischen Verhältnisse in dem Brustraum folgende. Seitlich liegen die beiden Brustfellsäcke, welche die beiden Lungenflügel enthalten (Fig. 8). In der Mitte (hinter dem Brustbein) lassen die Brustfellsäcke einen Raum frei, welcher Mittelraum, Mediastinum, genannt wird. In ihm liegt der Herzbeutel, das Pericardium, davor (bei jugendlichen Individuen) die Thymusdrüse, hinter dem Herzbeutel die Luftröhre, die Speiseröhre, die Aorta und andere Gefäße, der Nervus vagus und andere Nerven. Da die Lungen bei ihrer Entwickelung in die Brustfellhöhle hineinwachsen und das Brustfell vor sich her einstülpen, kann man an dem Brustfell zwei Blätter unterscheiden; das eine, welches die Lunge überkleidet, heißt Pleura pulmonalis, das andere, welches der Brustwand anliegt, Pleura parietalis; ein Teil des letzten Blattes liegt auf dem Zwerchfell (Pleura diaphragmatica), ein Teil grenzt an das Mediastinum (Pleurame-

[1]) Der Artikel „Leibeshöhle" hat inhaltliche Beziehungen zu den Artikeln „Keimblätter" und „Excretionsorgane", welche man vergleichen möge.

diastinalis, Mittelfell), der größte Teil liegt an den Rippen (Pleura costalis, Rippenfell).

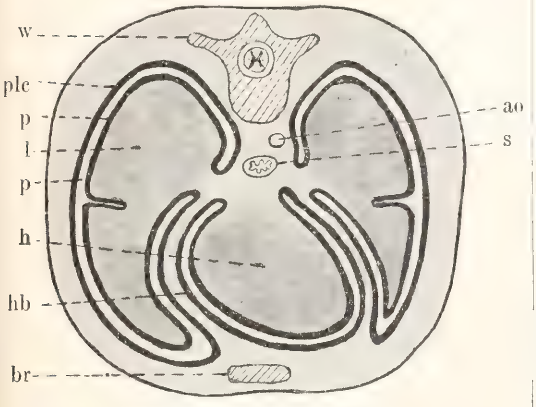


Fig. 8. Schematischer Querschnitt durch die Brust des Menschen. ao Aorta descendens, br Brustbein, h Herz, hb Herzbeutel, l Lunge, p Brustfellsack, plc Pleura costalis, plp Pleura pulmonalis, s Schlund (Oesophagus), w Wirbel.

An dem Bauchfell des Menschen und der Säugetiere sind folgende Teile zu unterscheiden (Fig. 9). Zunächst das viscerale Blatt

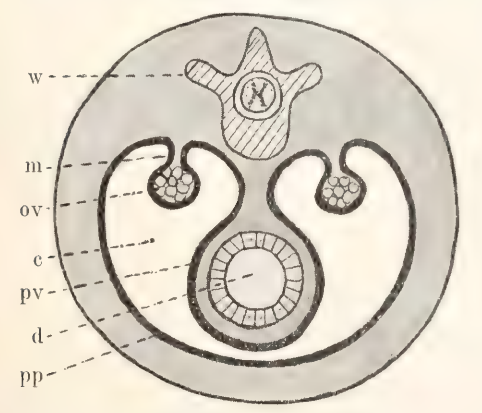


Fig. 9. Schematischer Querschnitt durch den Bauch eines Säugetier-Embryos. c Bauchhöhle (Coelom), d Darm, ov Ovarium (Eierstock), m Mesovarium, pp Peritoneum parietale, pv Peritoneum viscerale, w Wirbel.

(Peritoneum viscerale), welches die Eingeweide überkleidet, und das parietale Blatt (Peritoneum parietale), welches die Innenfläche der Bauchwand überzieht. Das Gekröse, Mesenterium, welches den Darm mit der dorsalen Wand der Bauchhöhle verbindet, ist auf jeder Seite von dem Bauchfell bekleidet.[1]) Eine ähnliche Verbindung mit der dorsalen Wand der Bauchhöhle besitzen jederseits der Eierstock in dem Mesovarium, der Hoden in dem Mesorchium. Die Leber ist durch eine ebensolche Verbindung am Zwerchfell und an der ventralen Bauchwand befestigt (Ligamentum suspensorium hepatis, Aufhängeband der Leber). Ein Teil des Mesenteriums, welcher zwischen der Leber und dem Magen ausgespannt ist, heißt das kleine Netz (Omentum minus, früher auch Epiploon genannt); dessen rechter Rand geht an die Leberpforte und wird Ligamentum hepato-duodenale genannt. Das Mesenterium des Magens heißt Mesogastrium, das des Dickdarms Mesocolon. Durch eine Faltung des Mesogastriums entsteht das große Netz, Omentum majus. Dasselbe hängt wie eine Schürze an der Bauchwand über die Masse der Dünndarmschlingen herab; die Falte enthält einen flachen Hohlraum, den Netzbeutel (Bursa omentalis, Saccus peritonei retroventricularis), welcher von der hinteren Seite des Magens herabsteigt und dessen Eingang hinter dem kleinen Netz über dem Zwölffingerdarm liegt und Foramen Windslowi genannt wird. Im weiblichen Körper heißt der vom Bauchfell begrenzte Teil der Bauchhöhle, welcher sich zwischen den Uterus und den Mastdarm einschiebt, der Douglassche Raum.[1])

Eine Ausstülpung des Bauchfells geht beim Embryo in den Hodensack hinein; sie wird Scheidenfortsatz (Processus vaginalis peritonei) genannt. Der Kanal, welcher den Hohlraum des Hodensackes mit der Bauchhöhle verbindet, heißt Leistenkanal[2]) (Inguinalkanal); durch diesen Kanal steigt in embryonaler Zeit der Hode aus der Bauchhöhle in den Hodensack herab, worauf der Kanal sich schließt. Der Hode ist also in ähnlicher Weise von dem Bauchfell umschlossen, wie die Lunge vom Brustfell umgeben ist (Fig. 10 und 11).

[1]) Das Mesenterium enthält zwischen den beiden Bauchfellepithelien Bindegewebe und Fett, Blutgefäße, Lymphgefäße und Lymphdrüsen (Mesenterialdrüsen), sowie Nerven.

[1]) Douglas, Description of the peritoneum, London 1730.

[2]) Der Leistenkanal geht über das Leistenband (Ligamentum inguinale, Ligamentum Pouparti) hinweg und hat von ihm seinen Namen. Dieses Band verläuft vom vorderen Ende des Darmbeinkammes zum vorderen Teil des Schambeins. Der in der Nähe befindliche Teil der Bauchwand heißt Leistengegend, Inguinalgegend. Der Leistenkanal hat eine innere Oeffnung, deren von Fascien gebildete Umrandung innerer Leistenring (Annulus inguinalis internus) heißt, und eine äußere Oeffnung, welche von dem Leistenband und von Fasern der Sehne des oberflächlichen schiefen Bauchmuskels begrenzt ist (äußerer Leistenring, Annulus inguinalis externus).

2b) Die ontogenetische Entstehung der Leibeshöhle bei den Wirbeltieren. Sieht man von dem Amphioxus ab, bei welchem die Verhältnisse der Leibeshöhle sehr eigenartig sind, so läßt sich bei allen übrigen Wirbeltieren für die Entstehung der Leibeshöhle ein einheitliches Schema aufstellen. Wir gehen dabei von dem Stadium aus, in welchem jederseits neben der Chorda der Mesodermstreifen entwickelt ist[1]). An dem Mesodermstreifen treten die Ursegmente auf, deren Bildung in der Nackengegend beginnt und sowohl nach vorn in die Kopfregion als auch hauptsächlich nach hinten in die Rumpf- und Schwanzregion fortschreitet. Der laterale Teil der Mesodermstreifen, welcher an der Bildung der Ursegmente nicht beteiligt ist, besteht aus zwei Zellenschichten, den Seitenplatten (Fig. 12 und 13).

Fig. 10. Fig. 11.

Fig. 10 und 11. Zwei Schemata zur Veranschaulichung der Bauchfellausstülpung, welche in den Hodensack geht. Aus O. Hertwig, Elemente der Entwickelungslehre. Bei Figur 10 ist der Hoden noch nicht in den Hodensack eingetreten, bei Figur 11 befindet er sich schon in demselben. 1 Bauchhaut; 2 bindegewebige Schichten der Bauchhaut; 3 Muskelschicht der Bauchhaut, 4 Bauchhaut; 1′ Haut des Hodensackes; 2′ Bindegewebsschichten desselben; 3′ Muskeln desselben; 4′ Bauchfell im Hodensack; h Hoden; sl Samenleiters; lr Leistenring.

Man nennt die obere dieser beiden Schichten das Hautfaserblatt (Somatopleura, somatisches Blatt, parietales Mesoderm, Fibrosum externum), die untere das Darmfaserblatt (Splanchnopleura, splanchnisches Blatt, viscerales Mesoderm, Fibrosum internum. Fig. 12).

Zwischen diesen beiden Blättern entsteht ein flacher Hohlraum, die Leibeshöhle, das Coelom. Dieser Hohlraum erweitert sich in der Herzgegend und bildet so die Pericardialhöhle. Die Trennung derselben von der übrigen Leibeshöhle entsteht an der Stelle, wo die großen Venen (Ductus Cuvieri) in das Herz eintreten. Die übrige Leibeshöhle erweitert sich ebenfalls; sie umgibt den Darm (Fig. 13); bei denjenigen Wirbeltierembryonen, bei welchen zu dem Darm ein Dottersack gehört, wachsen die Seitenplatten um den Dottersack herum, so daß die Leibeshöhle als schmaler Spaltraum auch den ganzen Dottersack umschließt.

Da die Leibeshöhle aus zwei seitlichen Teilen ihren Ursprung nimmt, so kommen die Seitenplatten von den Seiten her medianwärts zusammen; und zwar geschieht dies sowohl über dem Darm als auch unter dem Darm; so entsteht über dem Darm das dorsale Mesenterium, welches dauernd bestehen bleibt und durch welches Blutgefäße an den Darm herantreten können (Fig. 13 und 9); unter dem Darm wird ein ganz ähnliches unteres (ventrales) Mesenterium gebildet (Fig. 13), das aber bald verschwindet, so daß die beiderseitigen Teile der Leibeshöhle ventral zu einem einzigen Raume zusammenfließen (Fig. 9).

Aus den Seitenplatten geht das Epithel der Leibeshöhle hervor, also das Bauchfell und (bei den Säugetieren) das Brustfell.

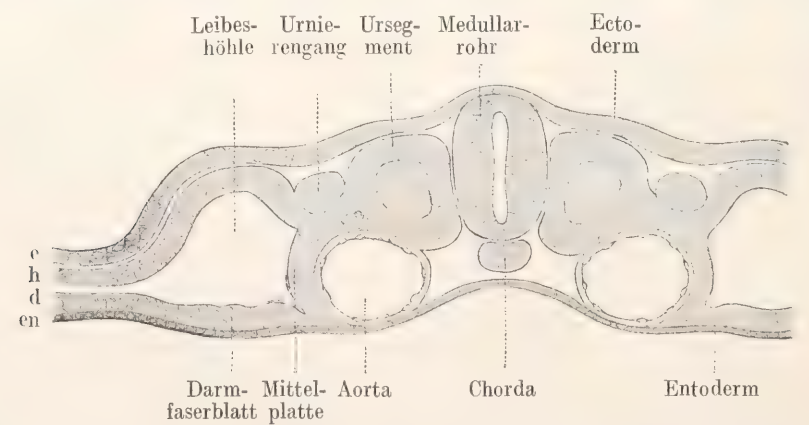


Fig. 12. Querschnitt durch den Embryo eines Hühnchens am Anfang des 3. Tages der Bebrütung. Nach Kollmann. e Extoderm, h Hautfaserblatt, d Darmfaserblatt, en Entoderm.

[1]) Vgl. den Artikel „Keimblätter".

Aber die Seitenplatten haben außerdem auch noch andere Aufgaben; sie sind an der Bildung der Exkretionsorgane beteiligt, sowie an der Entstehung des Mesenchyms und an der Anlage der Extremitäten

Da die Anlage der Gonaden von dem Bauchfell ausgeht, stammen diese ebenfalls von den Seitenplatten ab; bei manchen

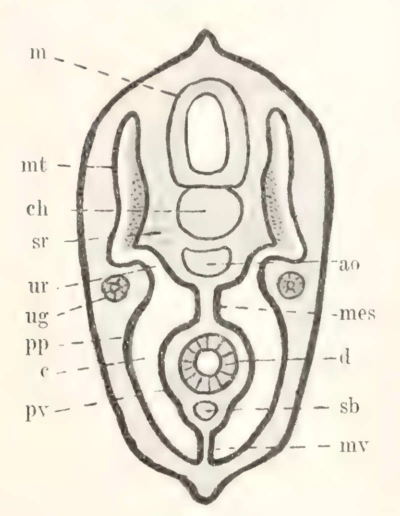


Fig. 13. Schematischer Querschnitt eines Haifisch-Embryos in dem Stadium, in welchem die Ursegmenthöhlen noch mit der Leibeshöhle zusammenhängen. m Medullarrohr, ch Chorda dorsalis, ao Aorta descendens, ug Vornierengang (Urnierengang), mes dorsales Mesenterium, mt Myotom, an dessen medialer Wand schon Muskulatur entwickelt ist, mv ventrales Mesenterium, sb Vena subintestinalis, c Leibeshöhle (Coelom), pp Hautfaserblatt, pv Darmfaserblatt, ur Verbindungsgang zwischen dem Myotom und der Leibeshöhle (wird zu einem Urnierenkanälchen).

Wirbeltieren werden die Urgeschlechtszellen schon in früher Zeit sichtbar, meistens an dem dorsalen Mesenterium, oder in der Nähe desselben. Bei manchen Selachiern greift die Segmentierung der Ursegmente noch ein wenig auf das Gebiet der Leibeshöhle über, so daß die Urgeschlechtszellen in segmentweise abgeteilten Abschnitten der Leibeshöhle liegen, den Gonotomen.

Die Ursegmente bilden die Myotome, d. h. die Segmente der Muskulatur (Myomeren); die Entwickelung der Muskelfasern beginnt in der medianwärts gelegenen Wand des Myotoms (Fig. 13). Bei den Embryonen der Haifische hat jedes Ursegment ursprünglich einen Hohlraum, die Ursegmenthöhle, welche mit der Leibeshöhle zusammenhängt (Fig. 13). Aus der Ursegmenthöhle geht die Myotomhöhle hervor, die bald verschwindet; sie steht durch einen Kanal mit der Leibeshöhle in Verbindung (Fig. 13 und 14 rechts), welcher Urwirbelkommunikation (nach Rabl) oder Sklero-nephrotom (nach Rückert) oder Mesomer (nach van Wijhe) genannt wird, und an welchen sich ventralwärts das erwähnte Gonotom nach Rückert oder Hypomer (nach van Wijhe) anschließt. Nachdem sich das Myotom abgetrennt hat, geht aus diesem Kanal ein Urnierenkanälchen hervor, das in den Urnierengang einmündet.

2c) Das Kopfcoelom. Alle Forscher stimmen darin überein, daß in der Kopfregion der Wirbeltiere ebenfalls Ursegmente vorhanden sind, aber über die Zahl dieser Segmente gehen die Meinungen weit auseinander. Der Kopf der Wirbeltiere hat im Laufe der phyletischen Entwickelung so große Umwandlungen erfahren, daß man die Zahl der Segmente am ausgebildeten Kopf nicht mehr erkennen kann. Die besten Anhaltspunkte für eine Theorie der Entstehung des Wirbeltierkopfes geben die Embryonen der Haifische; auf diese beziehen sich die Studien von van Wijhe, Froriep und Braus, die Untersuchungen von Dohrn, sowie meine eigenen Studien und die meiner Schüler Klinkhardt, Guthke und Brohmer. Es ist nicht möglich, an dieser Stelle auf die Meinungsverschiedenheiten einzugehen; ich muß mich also darauf beschränken, meine eigene Ansicht auszusprechen. Darnach befindet sich in jedem Kiemenbogen der cranioten Wirbeltiere eine Fortsetzung der Leibeshöhle, wie dies auch bei Amphioxus der Fall ist. Ursprünglich gehört also zu jedem Kiemenbogen ein Ursegment. Die Kiemenspalten liegen demnach zwischen den Verbindungskanälchen der Myotome und der Leibeshöhle (Fig. 14). Die Reihe der regelmäßigen Myotommuskeln läßt sich von hinten nach vorn bis zu dem vierten Bogen (ersten Vagusbogen) verfolgen. An dem dritten Bogen (Glossopharyngeus-Bogen) und an dem zweiten (Hyoid-Bogen, Facialis-Acusticus-Bogen) ist das Myotom rudimentär und sind die Höhlen nur durch kleine unregelmäßige Hohlräume repräsentiert (in Fig. 14 sind in schematischer Weise große Myotomhöhlen gezeichnet). Der Kieferbogen (Mandibularbogen) verhält sich ähnlich wie die Kiemenbögen; er unterscheidet sich aber dadurch, daß er eine geräumige Ursegmenthöhle enthält, die Mandibularhöhle, während die Ursegmenthöhlen der folgenden Kiemenbögen rudimentär geworden sind. Vor dieser Kieferbogenhöhle liegt noch jederseits eine ähnliche Höhle, die Prämandibularhöhle. Ich betrachte sie als ein Ursegment, welches vor dem Mund liegt und folglich keinen Kiemenbogenteil und keine Verbindung mit der übrigen Leibeshöhle besitzen kann. — Das Grundschema des Kopfes muß also die Gliederung aufweisen, welche Figur 14 zeigt.[1])

[1]) Die Begründung meiner Auffassung ist in folgender Schrift enthalten: H. E. Ziegler, Die phylogenetische Entstehung des Kopfes der Wirbeltiere. Jena 1908 (Jenaische Zeitschrift 43. Bd.).

2d) Die Leibeshöhle bei Amphioxus. Bei Amphioxus ist der Darm von einer Leibeshöhle umgeben, welche der der anderen Wirbeltiere gleicht. Aber in der Kiemenregion ist die Leibeshöhle durch folgende Räume vertreten: 1. jederseits einen langen flachen Raum, welcher über den Kiemenbögen gelegen ist und von welchem die Nierenkanälchen zu der Perikardialhöhle gegen (vgl. den Artikel „Amphioxus"); 2. durch einen medianen unpaaren Raum unter der Hypobranchialrinne (dem Endostyl); 3. durch röhrenförmige Räume in den Kiemenbögen, welche von dem erstgenannten Coelomraum zu dem zweitgenannten führen.

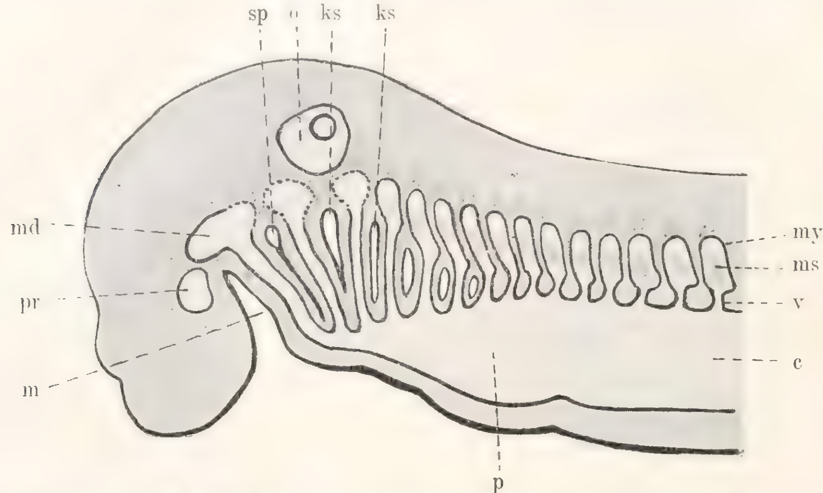


Fig. 14. Schema des Kopfes eines Haifisch-Embryos zur Darstellung des Kopfcoeloms und der Kopfhöhlen. Original. m Mund. md Mandibularhöhle. pr Prämandibularhöhle. sp Spitzloch (erste Kiemenspalte). ks Kiemenspalte. o Ohrbläschen. my Myotom. ms Muskelstreifen des Myotoms. c Leibeshöhle (Coelom). p Pericardialhöhle. v Verbindungskanälchen des Myotoms mit der Leibeshöhle (Urwirbelkommunikation).

Die Leibeshöhle des Amphioxus entsteht ontogenetisch durch das Zusammenfließen segmentaler Höhlen; denn bei Amphioxus besteht der ganze Mesodermstreifen aus den Ursegmenten (vgl. den Artikel „Amphioxus"). Die ventralen Teile der Ursegmente, welche den Seitenplatten der anderen Wirbeltiere entsprechen, vereinigen sich, um die Leibeshöhle zu bilden.

Nachdem die Leibeshöhle sich von den Ursegmenten gesondert hat, trennen sich an den unteren Enden der letzteren die Anlagen der Gonaden ab. Die Gonaden sind also bei Amphioxus segmentale Gebilde. Die Anlage der Gonade stülpt sich in das vorhergehende Ursegment ein, welches einen umhüllenden Raum bildet, die Genitalkammer.

2e) Der phyletische Ursprung der Leibeshöhle der Wirbeltiere. Es kann mit aller Wahrscheinlichkeit angenommen werden, daß die Segmentierung des Wirbeltierkörpers, welche sich in den Gehirn- und Spinalnerven, der Wirbelsäule und den Muskeln zeigt, von der Gliederung der Muskulatur bedingt ist. Amphioxus und die Fische zeigen uns die regelmäßige Reihe der Muskelsegmente, welche jedenfalls älter ist als das gegliederte Skelett, und zu welcher die regelmäßige Reihe der Spinalnerven gehört. Die Entstehung der Ursegmente ist also der Ausgangspunkt der ganzen Segmentierung.

Faßt man die Embryologie des Amphioxus ins Auge, so kann man zu der Ansicht kommen, daß die Ursegmente sogar phyletisch älter sind als die einheitliche unsegmentierte Leibeshöhle, während die Embryologie der übrigen Wirbeltiere zu dieser Auffassung keinen Anlaß gibt, da hier zuerst ein unsegmentierter Mesodermstreifen entsteht, an dem die Ursegmente sich abgliedern. Es bleibt also die Frage offen, ob die Segmentierung älter ist als die einheitliche Leibeshöhle oder umgekehrt.

In beiden Fällen erhebt sich die weitere Frage, ob das segmentierte oder unsegmentierte Coelom als Enterocoel, als Gonocoel oder als Nephrocoel aufzufassen ist. Die meisten Autoren sind der Ansicht, daß ein Enterocoel vorliegt. Indem man betont, daß die einzelnen Ursegmente bei Amphioxus durch Ausstülpung vom Urdarm aus entstehen, kann man die Höhle jedes einzelnen Ursegments als ein Divertikel der Darmhöhle betrachten (Fig. 15). Ferner kann man die Entstehung der Mesodermstreifen bei den Selachiern und den Amphibien als Divertikelbildung auffassen, wie dies die Gebrüder Hertwig getan haben, und kommt folglich zu der Theorie, daß der Mesodermstreifen als Ganzes als Ausstülpung vom Hinterende des Urdarms seinen Ursprung genommen habe. In beiden Fällen wird die sekundäre Leibeshöhle der Wirbeltiere als Enterocoel aufgefaßt.

Jedoch ist diese Auffassung nicht die einzig

mögliche; die Bildungsweise des Mesoderms ist bei den Amnioten die solide Herauswucherung am Primitivstreifen; bei den Selachiern kann sie ebenfalls als solide Wucherung aus dem Entoderm, bei Knochenfischen und Amphibien als solide Abspaltung vom Entoderm angesehen werden. Es läßt sich demnach bestreiten, daß die Divertikelbildung die ursprüngliche Bildungsweise ist und daß die Leibeshöhle von der Darmhöhle sich herleitet.

Ich muß also darauf aufmerksam machen, daß das Problem bei den Wirbeltieren ganz das-

Die Tiere mit primärer Leibeshöhle haben Urnierenkanälchen, Protonephridien (vgl. S. 49 Anm.), diejenigen mit sekundärer Leibeshöhle echte Nephridien (Metanephridien), d. h. Kanäle, welche mit einer flimmernden Oeffnung in der Leibeshöhle beginnen. Die sekundäre Leibeshöhle hat eine exkretorische Funktion und außerdem kommt ihr in vielen Fällen die Aufgabe zu, in ihrer Wand die Sexualzellen zu entwickeln, und diese durch die Ausführungskanäle

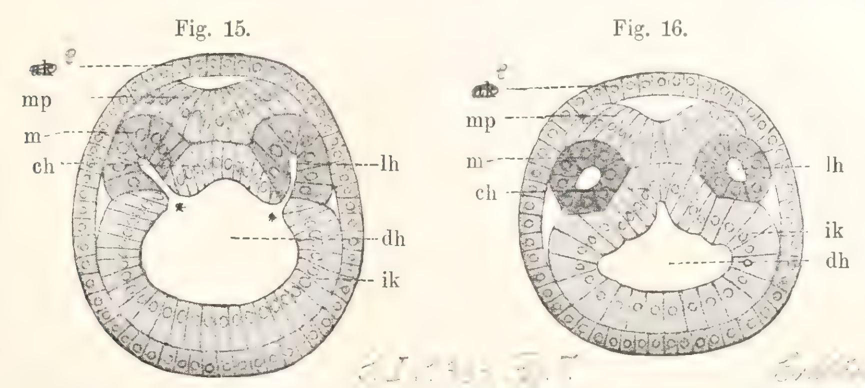


Fig. 15 und 16. Zwei Querschnitte eines Amphioxus-Embryo, welche die Bildung der Ursegmente zeigen. Nach Hatschek. Bei Figur 15 ist die Ausstülpung des Entoderms zu sehen, bei Figur 16 ist das Ursegment abgeschnürt.

selbe ist] wie bei den Wirbellosen. Man kann die Frage erheben, ob die erwähnten Vorgänge der Ontogenie palingenetischen Wert haben; bezweifelt man dies, so ist man nicht mehr an die Enterocoeltheorie gebunden. Dann kann auch die Genocoeltheorie auf die Wirbeltiere angewendet werden, da ja bei den Cranioten die Gonade aus der Wand der Leibeshöhle entsteht und bei Amphioxus jedes Ursegment eine Gonade erzeugt; oder man kann die Nephrocoeltheorie rechtfertigen, da jedem Ursegment ein Nierenkanälchen entspricht und bei Amphioxus sogar wie bei manchen Anneliden Protonephridien (Solenocyten) an den Nierenkanälchen ansitzen. Ich muß aber auch hinsichtlich der Wirbeltiere auf die Erörterungen des letzten Abschnittes verweisen, welcher den Ursprung der Leibeshöhle betrifft.

3. Die Leibeshöhle bei den wirbellosen Tieren. Indem ich die Frage des phyletischen Ursprungs der sekundären Leibeshöhle auf den letzten Abschnitt verschiebe, habe ich zunächst nur von dem Unterschied der primären und der sekundären Leibeshöhle zu sprechen, welcher auf anatomischen Merkmalen beruht und über welchen keine erheblichen Meinungsverschiedenheiten unter den Forschern bestehen. Die primäre Leibeshöhle (Protocoel, Schizocoel, Pseudocoel) hat keine eigene epitheliale Wand, die sekundäre Leibeshöhle (Deuterocoel, Metacoel, (Coelom ist von einem Epithel begrenzt.

nach außen zu leiten. Ich will nun die einzelnen Typen oder Stämme der wirbellosen Tiere in systematischer Reihenfolge vornehmen und kurz den Charakter der Leibeshöhle angeben.[1])

Ich sehe davon ab, die wirbellosen Tiere in Coelomtiere und Tiere ohne Coelom einzuteilen. Ich bemerke nur in historischer Hinsicht, daß Haeckel (1895) die Tiere, welche eine sekundäre Leibeshöhle haben, unter dem Namen Coelomarien zusammenfaßte; er rechnet dazu außer den Wirbeltieren die Tunicaten, Arthropoden, Mollusken, Echinodermen und höheren Würmer (Leibeshöhlenwürmer, Coelhelminthen). Neuerdings hat Grobben sämtliche Metazoen mit Ausnahme der Coelenteraten (Spongien und Cnidarien) als Coelomata bezeichnet; diese Benennung hat wenig Wert, wenn sie in dieser Weise auf Tiere ohne Leibeshöhle sowie auf Tiere mit primärer und mit sekundärer Leibeshöhle angewandt wird.

3a) Plathelminthen, Rotatorien und Nemertinen. Wo bei Plattwürmern eine Leibeshöhle vorkommt, ist sie stets eine primäre Leibeshöhle, ein Schizocoel. Die Exkretionsorgane sind stets Protonephridien, beginnend mit Wimpertrichtern, die durch eine Zelle ab-

---

[1]) Genauere Angaben über die einzelnen Stämme und Klassen sind in meiner Schrift über die Coelomfrage (1898) enthalten.

geschlossen sind, also keine Verbindung mit der Leibeshöhle haben (Fig. 2, 17 und 22). Die Rädertiere (Rotatorien) haben eine deutliche Höhle zwischen der Körperwand und dem Darm, welche unzweifelhaft eine primäre Leibeshöhle darstellt; sie ist von Mesenchymzellen durchzogen und von den Aesten des Exkretionsapparates (Fig. 17).

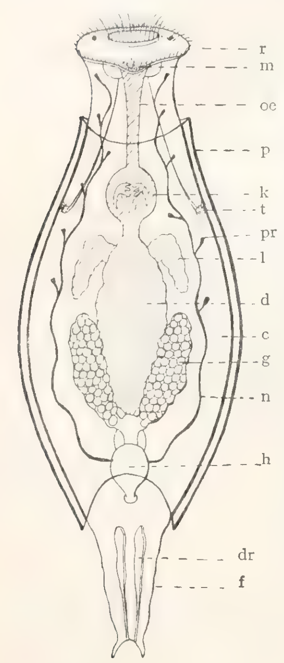


Fig. 17. Schema eines Rädertierchens. Ventrale Ansicht. Nach Delage und Hérouard. r Räderorgan. m Mund. oe Schlund (Oesophagus). p Panzer. k Kauapparat. t Taster. pr Protonephridium (Trichter mit Wimperflamme). l Leber. d Darm. c Primäre Leibeshöhle (Schizocoel) g Gonade. n Nierenkanal (Ausführungsgang der Protonephridien). h Harnblase. dr Drüsen des Fußes. f Fuß.

Die Schnurwürmer (Nemertinen) besitzen ebenfalls nur eine primäre Leibeshöhle, soweit sie überhaupt eine Leibeshöhle haben. Ihre Exkretionsorgane sind Protonephridien. Der Hohlraum in der Rüsselscheide, das sogenannte Rhynchocoelom, ist lediglich als ein Spaltraum entstanden, welcher den Zweck hat, die Bewegungen des Rüssels zu erleichtern.

3b) Die Nemathelminthen (Nematoden und Acanthocephalen). Ueber die Leibeshöhle der Nemathelminthen gingen die Ansichten der Forscher auseinander. Die Leibeshöhle der Nematoden wurde früher von den Gebrüdern Hertwig als eine sekundäre Leibeshöhle angesehen, da die Muskulatur so regelmäßig angeordnet ist. Neuerdings hält R. Hertwig die Leibeshöhle der Nematoden für eine primäre Leibeshöhle (ein Pseudocoel), eine Ansicht, welche ich schon früher (1898) vertreten habe. Der Exkretionsapparat hat zwar nicht deutlich den Charakter von Protonephridien, aber ist wahrscheinlich aus solchen hervorgegangen.

Die Leibeshöhle der Kratzer (Acanthocephalen) ist wahrscheinlich eine primäre Leibeshöhle. Die Exkretionsorgane sind Protonephridien. Die männlichen Geschlechtsorgane sind gegen die Leibeshöhle abgeschlossen, die weiblichen bei manchen Arten ebenfalls geschlossen, während bei anderen Arten die Eier in die Leibeshöhle fallen und von da durch die glockenförmige Oeffnung des Eileiters aufgenommen werden; dieser Zustand ist auffallend, aber kann sekundär entstanden sein, so daß man daraus keinen Schluß auf die Natur der Leibeshöhle zu ziehen vermag.

3c) Chaetognathen. Den Pfeilwürmern (Chaetognathen) ist von den Gebrüdern Hertwig eine sekundäre Leibeshöhle zugeschrieben worden; sie besteht aus drei Abschnitten, der Kopfhöhle, der Rumpfhöhle und der Schwanzhöhle. Die letzte enthält die Samenzellen und hat einen Ausführungsgang, der als Segmentalorgan aufgefaßt werden kann. Die Ovarien stehen aber mit der Rumpfhöhle nicht in Verbindung, sondern münden direkt durch die sich anschließenden Eileiter nach außen. Die Gebrüder Hertwig haben auf die Chaetognathen großes Gewicht gelegt, weil die Leibeshöhle embryologisch durch Ausstülpung vom Urdarm aus gebildet wird (Fig. 1), also in ihrem Sinne ein Enterocoel ist. Diese Ansicht ist auch jetzt noch die nahezu allgemein gültige.[1])

3d) Anneliden. Die Ringelwürmer (Anneliden) haben eine sekundäre Leibeshöhle; bei den Borstenwürmern (Chaetopoden) ist sie geräumig, bei den Blutegeln (Hirudineen) meistens auf kleine Hohlräume reduziert. Bei den Chaetopoden entstehen die Geschlechtszellen an der Wand der Leibeshöhle und fallen in die Leibeshöhle hinein; sie werden bei den Polychäten und manchen Oligochäten durch die Segmentalorgane nach außen geführt, bei anderen Oligochäten durch besondere Kanäle, die vielleicht Segmentalorganen entsprechen. Die Segmentalorgane beginnen mit offenem flimmerndem Trichter und leiten die Flüssigkeit aus der Leibeshöhle nach außen (Fig. 3). Allerdings sitzen bei vielen Polychäten an den Segmentalorganen auch Protonephridien in Form von Solenocyten an, was aber den Charakter der Leibeshöhle nicht zweifelhaft machen kann, da die ursprüngliche Form der Exkretionsorgane neben der späteren fortbestehen mag (vgl. den Artikel „Exkretionsorgane"). Jedenfalls hat die Leibeshöhle einen exkretorischen Charakter, da der Darm und die Blutgefäße mit Chloragogen-

---

[1]) Meine Bedenken gegen diese Auffassung habe ich in der Schrift über die Coelomfrage 1898 S. 65 und 66 ausgesprochen.

zellen besetzt sind, welche farbige Konkremente exkretorischer Art erzeugen und diese in die Leibeshöhle entleeren. In embryologischer Hinsicht ist zu bemerken, daß in der Larve zuerst die primäre Leibeshöhle auftritt als ein Spaltraum zwischen dem Ektoderm und dem Entoderm; diese primäre Leibeshöhle besteht noch in der Trochophora-Larve und ist mit Protonephridien ausgestattet (Fig. 18). Die sekundäre Leibeshöhle entsteht dann im Innern der Meso-

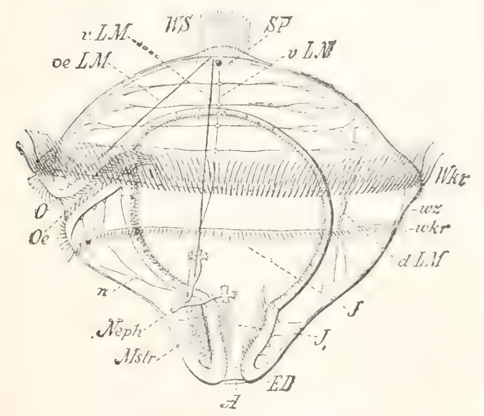


Fig. 18. Trochophora-Larve eines Annelids (Polygordius). Nach Hatschek aus R. Hertwigs Lehrbuch. Wkr praeoraler, wkr postoraler Wimperkranz. wz odorale Wimperzone. Ws Wimperschopf der Scheitelplatte. O Mund. Oe Schlund (Oesophagus). J Magen. J_1 Darm. ED Enddarm. A After. Neph Protonephridien in der primären Leibeshöhle. vLM, dLM, oeLM Muskeln in der primären Leibeshöhle. Mstr Mesodermstreifen. vLN, n Nerven.

dermstreifen, deren Bildung von zwei Urmesodermzellen ausgeht (Fig. 7 und 18). Indem sich die sekundäre Leibeshöhle ausdehnt, wird die primäre Leibeshöhle verdrängt, deren Reste das Blutgefäßsystem bilden (Fig. 5 und 6).

3e) Enteropneusten. Die Eichelwürmer (Enteropneusten) haben eine sekundäre Leibeshöhle, welche in mehrere Teile gegliedert ist. In der Eichel liegt das Eichelcoelom und die sogenannte Herzblase, welche beiden Organe zwar sehr verschieden an Größe, aber wahrscheinlich doch gleichwertig sind. Das Eichelcoelom mündet durch zwei Poren oder durch einen einzigen nach außen. Im Kragen liegt das Kragencoelom, welches durch die beiden Kragenpforten nach außen, d. h. in die erste Kiementasche, mündet. Das Rumpfcoelom erstreckt sich vom Kragen an durch die ganze Länge des Leibes; es besitzt ein dorsales und ein ventrales Mesenterium, ist aber nicht segmentiert und entbehrt der Nephridien. Die Geschlechtsorgane hängen mit dem Coelom nicht zusammen; sie bilden zahlreiche Säcke, welche jederseits in einer Längsreihe sich befinden und von welchen jeder durch einen oder mehrere Ausführungsgänge nach außen mündet. Was die Ontogenie betrifft, erscheint die Bildungsweise des Coeloms bei manchen Enteropneusten als Divertikelbildung vom Urdarm aus, zeigt aber bei anderen Arten so große Unterschiede, daß die theoretische Verwertung der Befunde schwierig wird.[1])

3f) Bryozoen und Brachiopoden. Unter den Moostierchen (Bryozoen) haben die endoprokten Bryozoen eine primäre Leibeshöhle; sie besitzen Protonephridien. Dagegen scheint den ektoprokten Bryozoen eine sekundäre Leibeshöhle zuzukommen; ihre geräumige Leibeshöhle wurde von den Gebrüdern Hertwig als eine erweiterte Gonadenhöhle aufgefaßt. Die Brachiopoden besitzen eine sekundäre Leibeshöhle, welche von Flimmerepithel ausgekleidet ist. Sie erstreckt sich auch in die Arme und in die Mantelfalten. Die Geschlechtsprodukte fallen in die Leibeshöhle und werden durch Nephridien entleert, welche offenbar den Segmentalorganen der Anneliden entsprechen. Bei manchen Brachiopoden entsteht die Leibeshöhle durch Divertikelbildung des Urdarmes.

3g) Arthropoden. Betrachtet man die Leibeshöhle der Gliedertiere (Arthropoden) nur vom anatomischen Standpunkt, so scheint einfach eine primäre Leibeshöhle vorzuliegen. Die Leibeshöhle ist mit Blut erfüllt. Es gibt keine Nephridien, welche gegen die Leibeshöhle geöffnet sind, aber bei den Crustaceen findet man ein oder zwei Paare von Bläschen mit Nierenschläuchen (Antennendrüse und Schalendrüse), welche die sekundäre Leibeshöhle repräsentieren könnten; entsprechende Organe sind die Nephridien des Peripatus.[2]) Die Geschlechtsorgane der Arthropoden haben keine Verbindung mit der Leibeshöhle und besitzen stets ihre besonderen Ausführungsgänge. Die Entwickelungsgeschichte zeigt, daß außer der primären Leibeshöhle, welche als Spaltraum auftritt, auch ein segmentiertes Coelom, eine gegliederte sekundäre Leibeshöhle in den Anlagen der Ursegmente auftritt. Es bildet sich jederseits eine Reihe solcher Ursegmente, welche aber einen rudimentären Charakter haben und deren Hohlraum mit der primären Leibeshöhle zusammenfließt. Es ist wahrscheinlich, daß ursprünglich zu jedem Ursegment ein ausführen-

---

[1]) Ich verweise auf die Ausführungen von Korschelt und Heider, Allg. Teil, S. 281 bis 285.

[2]) Wahrscheinlich auch die Coxaldrüsen des Limulus und mancher Arachnoideen.

der Kanal, ein Nephridium, gehörte; die Exkretionsorgane der Crustaceen und des Peripatus lassen sich als solche segmentale Nephridien auffassen. Die Gonaden der Arthropoden lassen sich von den Ursegmenten ableiten und ihre Ausführungsgänge sind segmentalen Nephridien homolog.

3h) Mollusken. Die Weichtiere (Mollusca) zeigen sowohl die primäre als auch die sekundäre Leibeshöhle in typischer Ausbildung. Die letzte ist nur durch den Herzbeutel (die Pericardialhöhle) repräsentiert, die erste durch alle diejenigen Hohlräume des Molluskenkörpers, welche mit Blut erfüllt sind (Fig. 4). Die Blutgefäße öffnen sich in große lakunäre Räume, welche von mesenchymatischen Muskeln durchzogen sind. Der Herzbeutel, welcher die sekundäre Leibeshöhle darstellt, umschließt das Herz und hat auch eine exkretorische Funktion, zu welchem Zweck häufig ein Teil seines Epithels drüsig entwickelt ist (Pericardialdrüsen); der Nierenschlauch beginnt mit flimmerndem Trichter in der Pericardialhöhle und läßt sich daher mit einem Segmentalorgan eines Annelids vergleichen. Die Gonaden sind bei den meisten Mollusken von der Leibeshöhle getrennt und haben besondere Ausführungsgänge (Fig. 4). Aber bei manchen Cephalopoden hängt die Genitalhöhle mit der Pericardialhöhle zusammen, so daß die Geschlechtsprodukte durch einen Teil der sekundären Leibeshöhle hindurchgehen. Bei den Solenogastres erscheint die Pericardialhöhle geradezu als die Fortsetzung der Gonadenhöhle (Fig. 19 und 20). Man kann also im Hinblick auf die Mollusken die Meinung vertreten, daß die Pericardialhöhle (sekundäre Leibeshöhle) ein Teil der ursprünglichen Genitalhöhle sei. In embryologischer Hinsicht schließen sich die Mollusken an die Anneliden an. Ihre typische Larve ist eine Trochophoralarve mit geräumiger primärer Leibeshöhle, ähnlich derjenigen der Anneliden (Fig. 18). Der Mesodermstreifen, dessen Bildung meistens von zwei Urmesodermzellen ausgeht, liefert das Pericardium und die Gonaden.

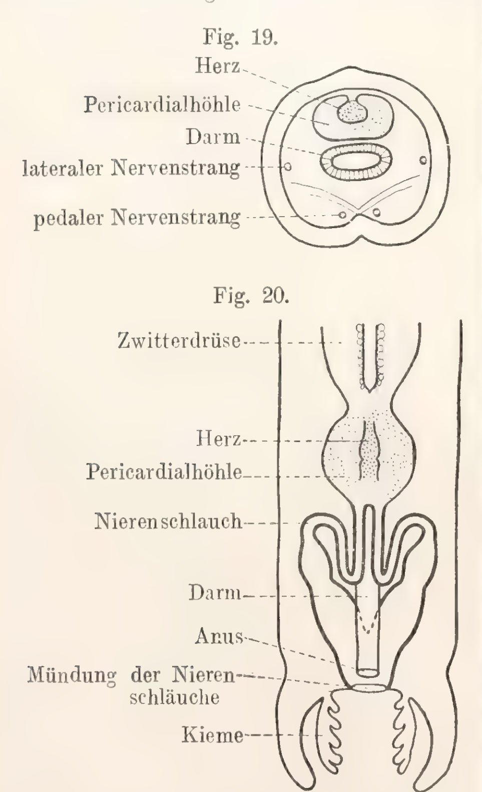


Fig. 19 und 20. Schematische Darstellung des Zusammenhanges der Gonaden mit der Herzbeutelhöhle (Pericardialhöhle) bei den Solenogastres in Anlehnung an Proneomenia, Paramenia und Choetoderma. Aus Ziegler, Coelomfrage (1898). Figur 19 stellt einen Querschnitt durch das Tier auf der Höhe der Pericardialhöhe dar.

3i) Echinodermen. Die geräumige Leibeshöhle der Stachelhäuter (Echinodermen) ist eine sekundäre Leibeshöhle. Nephridien sind nicht vorhanden, wenn man nicht etwa den Steinkanal des Wassergefäßsystems, welches sich von der sekundären Leibeshöhle ableitet, als ein umgestaltetes Nephridium betrachten will. Die Gonaden haben keine Beziehung zur Leibeshöhle.[1]) Bei den meisten Echinodermen werden vom Urdarm aus durch Abschnürung eine oder zwei Blasen gebildet (Fig. 21), deren Hohlraum die Leibeshöhle darstellt, von welcher

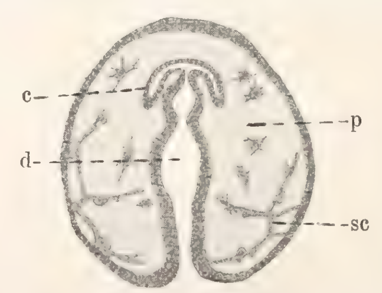


Fig. 21. Gastrula eines Seeigels, Echinus miliaris. Nach Selenka aus O. und R. Hertwig, Coelomtheorie (1882). c Anlage der Leibeshöhle, d Darm, p primäre Leibeshöhle mit Mesenchymzellen, sc Skelettstäbe.

[1]) Da die pelagisch lebende Larve noch keine Anlagen der Geschlechtsorgane zeigt, ist die Entwickelung der Gonaden nur unvollkommen bekannt. Ich erwähne aber die vereinzelt dastehende Beobachtung von Perrier, nach welcher die Gonade bei Crinoiden aus den splanchnischen Blatt der Leibeshöhle entsteht (Korschelt und Heider, Lehrbuch, 1. Bd., 1890, p. 302).

dann sekundär das Wassergefäßsystem sich abtrennt. Bei manchen Echinodermen (Ophiuren) entstehen diese Blasen durch solide Wucherung am Urdarm und erhalten dann sekundär den inneren Hohlraum.

3k) Tunicaten. Die Tunicaten müssen in Anbetracht ihrer Verwandtschaft mit den Wirbeltieren unter denselben Gesichtspunkten betrachtet werden wie diese. Sie selbst geben zur Beurteilung des Leibeshöhlenproblems keine genügenden Anhaltspunkte, weder in embryologischer noch in anatomischer Hinsicht. Die Gonaden sind geschlossene drüsenartige Organe mit eigenen Ausführungsgängen. Die Pericardialhöhle dürfte eine sekundäre Leibeshöhle repräsentieren. Im übrigen sind nur spaltartige Schizocoelräume vorhanden, welche mit Blut erfüllt sind.

4. Der phyletische Ursprung der sekundären Leibeshöhle. Die verschiedenen Meinungen, welche die Forscher über den phyletischen Ursprung der sekundären Leibeshöhle ausgesprochen haben, sind schon im historischen Abschnitt aufgeführt worden. Ich kann daher hier meine eigene Auffassung zum Ausdruck bringen. Dabei lege ich auf die anatomischen und die histologischen Verhältnisse mehr Gewicht als auf die embryologischen Tatsachen. Denn bei den letzteren bleibt immer die Frage offen, welche Vorgänge als palingenetisch und welche als caenogenetisch zu betrachten sind; oft sehen wir die Leibeshöhle bei nahe verwandten Tieren sowohl durch Divertikelbildung des Urdarmes als auch durch solide Wucherung entstehen und es ist eine Sache theoretischer Auffassung, ob man den ersten oder den letzten Bildungsmodus als den ursprünglichen betrachten will.

In vergleichend-anatomischer Hinsicht ziehe ich zunächst eine Grenzlinie zwischen den höheren Cnidarien und den Ctenophoren einerseits und den Würmern und allen übrigen Metazoen andererseits. Ich bin der Meinung, daß die Würmer sich sehr früh von den Cnidarien abgezweigt haben, indem gastrula- oder planulaähnliche Tiere eine kriechende Lebensweise angenommen haben. Die Vergleichung zwischen den Magentaschen der Anthozoen oder den Rippenkanälen der Ctenophoren einerseits und der sekundären Leibeshöhle der übrigen Metazoen andererseits ergibt also lediglich Analogien ohne irgendwelche phyletische Bedeutung. Der Versuch, die niederen Würmer von Anthozoen oder von Ctenophoren abzuleiten, scheint mir nicht geglückt zu sein. Die Darmdivertikel der niederen Würmer (Turbellarien und Trematoden) sind meiner Ansicht nach Bildungen eigener Art und entsprechen weder den Magentaschen der Cnidarien, noch der Leibeshöhle der höheren Würmer. Die niederen Würmer hatten ursprünglich einen einfachen unverzweigten Darm.[1]) Die höheren Würmer stammen unzweifelhaft von den niederen Würmern ab, ihre sekundäre Leibeshöhle kann also nicht auf die Magentaschen der Cnidarien zurückgeführt werden.

Für die phyletische Entstehung der sekundären Leibeshöhle kommen drei Theorien in Betracht. Entweder ist sie vom Darm aus durch Divertikelbildung entstanden und folglich als Enterocoel aufzufassen, oder sie ist aus der Gonade herzuleiten, folglich Gonocoel zu nennen, oder sie hat von Anfang an eine exkretorische Bedeutung und kann daher Nephrocoel heißen.

Zugunsten der Enterocoeltheorie können diejenigen Fälle angeführt werden, in welchen die Leibeshöhle ontogenetisch durch Ausstülpung vom Urdarm aus gebildet wird (Sagitta, Echinodermen, Brachiopoden, Balanoglossus, Amphioxus). Man kann der Leibeshöhle die Funktion zuschreiben, die Nahrungssäfte im Körper zu verteilen. Es tritt aber ein Funktionswechsel ein, indem die Höhle eine exkretorische Funktion erhält und mit eigenen Ausführungsorganen (Nephridien) versehen wird. Ferner werden in vielen Fällen die Gonaden in die Wand dieser Leibeshöhle eingelagert,[2]) so daß die Ausführungsgänge auch die neue Funktion der Ausfuhr der Geschlechtsprodukte erhalten. — Gegen die Enterocoeltheorie können mancherlei Einwände erhoben werden, von welchen die wichtigsten folgende sind. In embryologischer Hinsicht ist zu bemerken, daß bei den Anneliden und den Mollusken keine Spur einer Divertikelbildung des Urdarmes vorkommt; bei den Anneliden entstehen die Mesodermstreifen von zwei Urmesodermzellen aus, welche sich mit den Urgenitalzellen niederer Würmer vergleichen lassen.[3]) Allerdings sind die Anhänger der Enterocoeltheorie der Ansicht, daß die Divertikelbildung des Urdarms in die Zeit der Furchung zurückverlegt und also durch vorzeitige Sonderung auf zwei Zellen reduziert sein könne. Ferner kann gegen die Enterocoeltheorie geltend gemacht werden,

[1]) Sehr viele niedere Würmer besitzen einen einfachen Darm (Rhabdocoelen, manche Trematoden, die Rotatorien und Nemathelminthen); es wäre eine sehr unwahrscheinliche Hypothese, wenn man diesen einfachen Darm aus einem verzweigten ableiten wollte.

[2]) Die Gonaden sind die einzigen Organe, welche jedenfalls durch die ganze Reihe der Metazoen homolog gesetzt werden müssen. Da im ganzen Verlaufe der phyletischen Entwickelung stets Genitalzellen gebildet werden, muß die Keimbahn immer fortbestehen. Schon bei niederen Würmern (z. B. Nematoden) trennt sich die Keimbahn von den entodermalen Zellen.

[3]) Ich verweise auf das Lehrbuch von Korschelt und Heider. Allgemeiner Teil S. 269.

daß es fraglich bleibt, ob der ontogenetischen Entstehung der Leibeshöhle vom Urdarm aus eine palingenetische Bedeutung zukommt, da bei den meisten Tieren, welche diese Entstehungsweise zeigen, auch noch andere Bildungsarten der Leibeshöhle vorkommen (Brachiopoden, Echinodermen, Balanoglossus). Außerdem sind die Bildungsweisen des Coeloms durch Ausstülpung sehr verschiedenartig, sowohl hinsichtlich der Zahl der Enterocoelbildungen als auch hinsichtlich des Ortes derselben, so daß sekundäre Abänderungen sicherlich stattgefunden haben müssen. Es mag auch darauf hingewiesen werden, daß alle diejenigen Tiere, bei welchen die Divertikelbildung des Urdarms sich zeigt, eine rasche Entwickelung haben und pelagisch lebende Larven erzeugen; auch werden bei nahezu allen (mit Ausnahme der Chaetognathen) die Genitalzellen erst nach der Larvenzeit erkennbar.

Eine besondere Schwierigkeit ergibt sich für die Enterocoeltheorie bei den segmentierten Tieren. Man ist zunächst geneigt, ebensoviele Ausstülpungen des Urdarms anzunehmen wie Segmente der Leibeshöhle vorhanden sind (nach Analogie der Aussackungen des Darmes der Hirudineen und mancher Turbellarien). Aber es scheint mir undenkbar, daß diese zahlreichen Ausstülpungen jeder Seite auf den Austritt einer einzigen Zelle (Urmesodermzelle) reduziert würden. Man muß also die segmentierte Leibeshöhle der Anneliden aus einer einzigen Ausstülpung des Urdarmes ableiten (Fig. 25), welche durch den Austritt einer einzigen Zelle, der Urmesodermzelle, ersetzt werden kann. Diese Zelle ist aber nach dieser Auffassung eine Darmzelle und kann nicht gleichzeitig die Urgenitalzelle sein. Eine Homologisierung der Urmesodermzellem der Anneliden mit den Urgenitalzellen niederer Würmer scheint mir also auf diesem Wege nicht möglich zu sein. Will man die Urmesodermzelle als Urgenitalzelle ansehen, so kommt man zu der Gonocoeltheorie.

Für die Gonocoeltheorie lassen sich verschiedene vergleichend-anatomische und embryologische Tatsachen verwerten. Nach dieser Theorie ist die sekundäre Leibeshöhle der Anneliden aus der Gonadenhöhle der niederen Würmer entstanden; daraus erklärt sich sowohl die Tatsache, daß die Geschlechtszellen an der Wand der Leibeshöhle entstehen, als auch das Vorhandensein der Ausführungsgänge, welche Geschlechtsgänge darstellen. Der Uebergang von den niederen Würmern zu den gegliederten Anneliden wird nach der Gonocoeltheorie leicht verständlich, da die gekammerte Leibeshöhle aus einer Reihe von Gonaden hergeleitet werden kann (Fig. 23). Die Urmesodermzellen der Anneliden können den Urgenitalzellen der Nematoden und der Turbellarien homolog gesetzt werden, wie dies Korschelt wahrscheinlich gemacht hat. Insbesondere läßt sich für die Gonocoeltheorie die Auffassung von Goodrich anführen, nach welcher die Segmentalorgane der polychäten Anneliden aus zweierlei Gebilden bestehen, nämlich aus einem Protonephridium und aus einem

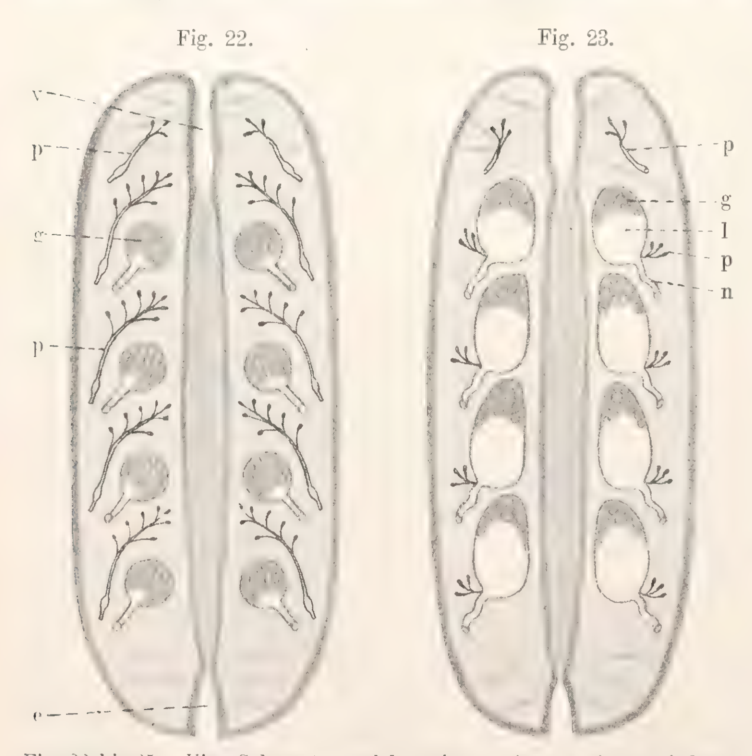


Fig. 22 bis 25. Vier Schemata, welche zeigen, wie von einem niederen Wurm (etwa einer Turbellarie) mit sich wiederholenden Protonephridien und Gonaden (Fig. 22) ein segmentierter Wurm mit sekundärer Leibeshöhle (etwa ein Chaetopode) abgeleitet werden kann. Fig. 23 zeigt die Ableitung im Sinne der Gonocoeltheorie, wobei die sekundäre Leibeshöhle durch Vergrößerung der Gonadenhöhlen entsteht.

Gonodukt (Geschlechtsgang), welche beiden Gebilde zuweilen deutlich getrennt, zuweilen vereinigt sind („Nephromixium"). Die Anneliden müssen demnach von solchen niederen Würmern abgeleitet werden, welche eine regelmäßige Reihe von Gonaden und eine ebensolche Reihe von Protonephridien gehabt haben (vgl. Fig. 22 und 23).

Unter den Mollusken lassen sich zugunsten der Gonocoeltheorie die Cephalopoden und vor allem die Solenogastres herbeiziehen, bei welchen die Leibeshöhle als Fortsetzung der Gonadenhöhle erscheint (Fig. 20). Auch die Wirbeltiere lassen sich zugunsten der Gonocoeltheorie verwerten, sowohl Amphioxus, bei welchem die Gonaden an den unteren Enden der Ursegmente entstehen, als auch die übrigen Wirbeltiere, bei welchen sie an dem dorsalen Teile der Leibeshöhle ihren Ursprung nehmen.

Da der sekundären Leibeshöhle eine exkretorische Funktion zukommt, muß ein Funktionswechsel angenommen werden, indem die ursprüngliche Gonadenhöhle ganz oder teilweise auch diese Funktion übernahm. Wenn nun eine Arbeitsteilung stattfand, konnte die Gonade sekundär von der Leibeshöhle abgetrennt werden, da ja die Gonaden bei vielen Coelomtieren keinen Zusammenhang mit der sekundären Leibeshöhle haben.

Als Einwände gegen die Gonocoeltheorie lassen sich diejenigen Fälle verwenden, in welchen die Gonaden ohne nachgewiesenen Zusammenhang mit der Anlage der Leibeshöhle entstehen und dauernd von der Leibeshöhle getrennt bleiben (Echinodermen?, Balanoglossus). Auch bei den Mollusken erscheint die Anlage des Herzbeutels ontogenetisch als eine selbständige Höhle, welche zwar an die Gonade angrenzt, aber nicht mit ihr verschmolzen ist.[1])

Eine dritte Theorie ist die **Nephrocoeltheorie**; sie wurde von mir aufgestellt (1898), um auf die theoretische Möglichkeit hinzuweisen, daß die sekundäre Leibeshöhle von den Exkretionsorganen aus entstanden oder von Anfang an als Exkretionsorgan angelegt sein könnte. Zugunsten der Nephrocoeltheorie kann auf die Tatsache verwiesen werden, daß die Segmentalorgane der Anneliden sehr nahe Beziehungen zu den Protonephridien haben. Es ließe sich also die Coelomhöhle als ein erweiterter Teil eines Protonephridiums oder als eine an einem Protonephridium entstandene Ausstülpung auffassen (Fig. 24). Bei dem Dinophilus des weißen Meeres stehen an Stelle der Protonephridien segmentale Bläschen mit Ausführungsgängen. P. und F. **Sarasin** sprechen in ihren Studien über Mollusken[2]) die Ansicht aus, daß die Leibeshöhlenkammern der Anneliden aneinandergereihte, se-

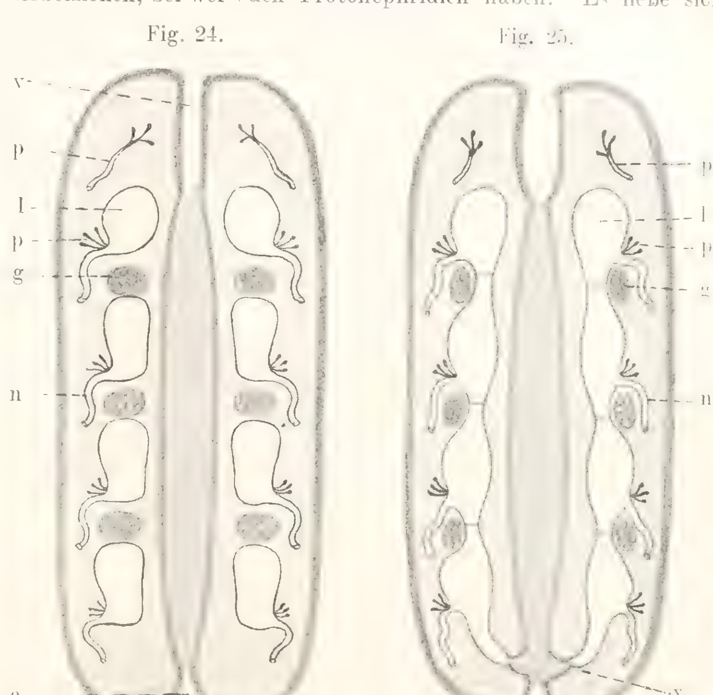


Fig. 24 zeigt die Ableitung im Sinne der **Nephrocoeltheorie**, wobei die sekundäre Leibeshöhle von den Protonephridien ihren Ursprung nimmt. Fig. 25 zeigt die Herleitung der sekundären Leibeshöhle im Sinne der **Enterocoeltheorie**, wobei die gekammerte Leibeshöhle durch eine einzige Ausstülpung des Darmes entstanden ist. v Vorderdarm, e Enddarm, p Protonephridien, e sekundäre Leibeshöhle, g Gonade, n Nephridium (Segmentalorgan), mit offenem Trichter an der Leibeshöhle beginnend, x Stelle der Bildung des Darmdivertikels. Die primäre Leibeshöhle ist mit einem hellgrauen Ton belegt, die sekundäre Leibeshöhle ist weiß.

[1]) Dies gilt nach den Untersuchungen von **Faussek** und von **Naef** auch für die Cephalopoden.

[2]) Die Landmollusken von Celebes 1899.

kundär außerordentlich vergrößerte Endblasen von Segmentalorganen seien und daß dementsprechend bei den Mollusken der Herzbeutel eine solche vergrößerte Endblase sei und der Nierenschlauch den zugehörigen Schleifenkanal darstelle (Fig. 4).

Faussek (1897 und 1900) hat eine Nephrocoeltheorie in folgender Art aufgestellt. Die sekundäre Leibeshöhle ist als ein Hohlraum zwischen den Muskeln entstanden und diente von Anfang an zur Ansammlung von Exkretionsprodukten; an ihr entstanden ausführende Kanäle, welche in manchen Fällen mit den Protonephridien sich verbunden haben. Die Verbindung des Coeloms mit den Geschlechtsorganen, welche in einigen Tierklassen eingetreten ist, muß als eine sekundär entstandene Einrichtung aufgefaßt werden, welche den Vorteil einer erleichterten Ausfuhr der Geschlechtszellen bot. In ähnlichem Sinn hat Thiele die Ansicht ausgesprochen, daß die Leibeshöhle bei den Anneliden als ein Lymphraum im Innern der Muskulatur entstanden sei, in welchen sich sekundär die Gonaden öffneten, wobei die Ausführungsgänge der Gonaden rückgebildet wurden und die ursprünglich exkretorischen Segmentalorgane auch zu den Geschlechtsgängen wurden. Thiele hat sich aber hinsichtlich der Mollusken auf den Standpunkt der Gonocoeltheorie gestellt, indem er das Pericardium und die Nierenschläuche derselben aus den ursprünglichen Geschlechtsgängen ableitet (Zoolog. Anzeiger Bd. 25 1902).

Die segmentierten Tiere bilden für die Nephrocoeltheorie keine Schwierigkeit, da eine Wiederholung der Protonephridien bei manchen Turbellarien und Nemertinen, sowie bei Dinophilus vorkommt (Fig. 22). Nach den Untersuchungen von Hatschek an Anneliden ist die Reihe der Segmentalorgane die direkte Fortsetzung der Reihe der Protonephridien, und auch nach der Theorie von Goodrich sind die Solenocyten der Segmentalorgane von Protonephridien abzuleiten. Es ist also leicht zu denken, daß die Segmenthöhlen zu den Protonephridien gehören könnten. Allerdings wäre dann bei den Anneliden eine Verschmelzung mit den Gonaden anzunehmen.

Bei denjenigen Metazoen, welche eine sekundäre Leibeshöhle haben, bestehen meistens enge Beziehungen zwischen den Gonaden und der Leibeshöhle mit den Exkretionskanälen; wenn diese Organe nicht direkt zusammengehören (Anneliden, Wirbeltiere), liegen sie doch benachbart (Mollusken). Dieselbe Zellmasse (Mesodermstreifen) oder sogar dieselbe Zelle (Urmesodermzelle) gibt diesen Organen den Ursprung. Wenn die Exkretionsorgane mit den Gonaden den Ursprung gemein haben, läßt sich die Nephrocoeltheorie mit der Gonocoeltheorie in Verbindung bringen. — Um aber von diesem Standpunkt aus die Tatsachen zu erklären, auf welche die Enterocoeltheorie gegründet ist, nämlich die Divertikelbildung des Urdarmes, muß man folgende Ueberlegung anstellen. Die Stammzelle der Gonaden und der Exkretionsorgane (die Urmesodermzelle, welche man in diesem Sinn Gononephrocyte nennen könnte), mag ontogenetisch eine Teilzelle einer Urentodermzelle sein; wenn dann zuerst zahlreiche Zellteilungen stattfinden, ehe die Produkte dieser Teilzelle sich von den Entodermzellen unterscheiden, so entsteht der Anschein, als ob die Anlagen der Gonaden und der Exkretionsorgane, d. h. die Mesodermstreifen, aus dem Entoderm herauswüchsen, wie wir dies z. B. bei den Wirbeltieren sehen. Aus einer lebhaften Herauswucherung kann dann leicht eine Divertikelbildung werden. Die ontogenetischen Tatsachen, auf welche sich die Enterocoeltheorie in erster Linie stützt, würden also bei dieser Auffassung als caenogenetisch anzunehmen sein.

Jede der drei Theorien, die Enterocoeltheorie, die Gonocoeltheorie und die Nephrocoeltheorie hat in der Wissenschaft ihre Anhänger. Es ist also nicht möglich, hier eine dieser Auffassungen als die einzig richtige hinzustellen. Wohl aber kann man sagen, daß die Enterocoeltheorie nicht mehr in dem Maße dominiert, wie dies früher der Fall war, und daß die Gonocoeltheorie von manchen bedeutenden Forschern vertreten wird, während die Nephrocoeltheorie zurzeit nur wenige Vertreter hat.

Literatur. ***O. Bütschli,*** *Ueber eine Hypothese bezüglich der phylogenetischen Herleitung des Blutgefäßsystems eines Teiles der Metazoen. Morphol. Jahrbuch Bd. 18 1883.* — ***V. Faussek,*** *Untersuchungen über die Entwickelung der Cephalopoden. Mitt. d. zool. Station zu Neapel Vol. 14 1901.* — ***E. S. Goodrich,*** *On the coelom, genital ducts and nephridia. Quart. Journ. Micr. Sc. Vol. 37 1895.* — ***Oskar und Richard Hertwig,*** *Die Coelomtheorie, Versuch einer Erklärung des mittleren Keimblattes. Jenaische Zeitschrift Bd. 15 1882.* — ***Oskar Hertwig,*** *Die Entwickelung des mittleren Keimblattes der Wirbeltiere. Jenaische Zeitschr. Bd. 16 1883.* — ***Korschelt und Heider,*** *Lehrbuch der vergleichenden Entwickelungsgeschichte der wirbellosen Tiere. Allgemeiner Teil 4. Lieferung S. 262—309. Jena 1910.* — ***Th. Huxley,*** *On the classification of the animal kingdom. Quart. Journ. Micr. Sc. Vol. 15 1875.* — ***Arnold Lang,*** *Beiträge zu einer Trophocoeltheorie. Jenaische Zeitschr. 31. Bd. 1908.* — ***J. Meisenheimer,*** *Die Exkretionsorgane der wirbellosen Tiere. Ergebnisse der Zoologie 2. Bd. 2. Heft. Jena 1909.* — ***Eduard Meyer,*** *Die Abstammung der Anneliden. Biolog. Zentralblatt 10. Bd. 1890* — ***Derselbe,*** *Studien über den*

Körperbau der Anneliden. Mitt. d. Zool. Station Neapel 7. Bd. 1887 u. 14. Bd. 1901. — ***C. Rabl,*** *Theorie des Mesoderms. Morphol. Jahrbuch 15. Bd. 1889.* — ***W. Salensky,*** *Morphogenetische Studien an Würmern. IV. Zur Theorie des Mesoderms. Mém. Acad. Imp. Sc. St. Pétersbourg Vol. 19 1907.* — ***H. E. Ziegler,*** *Ueber den derzeitigen Stand der Coelomfrage. Verhandl. d. Deutschen Zool. Ges. 1898.* — ***Derselbe,*** *Der Ursprung der mesenchymatischen Gewebe bei den Selachiern. Arch. f. Mikr. Anat. Bd. 32 1888* — ***Derselbe,*** *Lehrbuch der vergleich. Entwickelungsgeschichte der niederen Wirbeltiere. Jena 1902.*

H. E. Ziegler.

Leibniz
Gottfried Wilhelm von.

Geboren am 6. Juli 1646 zu Leipzig; gestorben am 14. November 1716 in Hannover. Sein Vater war Professor der Rechte. Bereits im fünfzehnten Jahre bezog Leibniz die Universität seiner Vaterstadt, um zunächst Jurisprudenz, bald aber Philosophie zu studieren, wendete sich dann nach Jena. Obwohl er sich früh umfassende philosophische Kenntnisse angeeignet hatte, wurde er wegen zu großer Jugend in Leipzig zur Promotion nicht zugelassen, weshalb er Leipzig für immer verließ und in Altdorf promovierte. 1667 schloß er sich dem ehemalig kurmainzischen Minister J. Chr. von Boyneburg an, für den er mehrere publizistische Schriften ausarbeitete. Reisen nach Paris und England in den Jahren 1672 bis bis 1676 brachten ihn in Berührung mit Huyghens, Collins, Boyle, und die dadurch angeregte Aufnahme seiner mathematischen Studien führte zur Erfindung der Differentialrechnung. 1676 wurde Leibniz Bibliothekar in Hannover, wo er bis zu seinem Ende verblieb. Seine Beziehungen zu verschiedenen Höfen suchte er zur Gründung von Akademien zu nutzen; so stiftete Friedrich I. 1700 nach seinen Angaben die Berliner Akademie, deren erster Präsident er wurde. Seine Bemühungen, Peter den Großen zur Stiftung einer Akademie zu vermögen, wurden erst nach seinem Tode mit Erfolg gekrönt. Historische Studien führten ihn nach Rom, seine durch die Jesuiten bis China reichenden Beziehungen nutzte er zu etymologischen Forschungen aus. Seine physikalischen Arbeiten beschäftigen sich mit der lebendigen Kraft, die er als charakteristisch für die Arbeitsleistung erkennt. In der Philosophie setzte er den Begriff der lebendigen Monaden an Stelle der toten Atome. Leibniz soll in der Neustädter Hofkirche in Hannover beigesetzt sein, wo ihm ein Grabmal errichtet wurde. Ein am Waterlooplatz in Hannover errichtetes Denkmal trägt die Aufschrift Genio Leibnitii.

Literatur. ***Guhrauer,*** *G. W. Freiherr von Leibnitz, Breslau 1842.* — ***Rosenberger,*** *Gesch. der Physik I, S. 254, Braunschweig 1882.*

E. Drude.

Leichtmetalle.

Zu den „Leichtmetallen" rechnet man diejenigen Metalle, deren Dichte nicht größer als 4 ist; es sind dies demnach die Alkalimetalle Lithium d 0,59, Natrium d 0,98, Kalium d 0,87, Rubidium d 1,52, Cäsium d 1,88; die Edelmetalle Beryllium d 1,93, Magnesium d 1,74, Calcium d 1,58, Strontium d 2,54, Barium d 3,75 und das Erdmetall Aluminium d 2,60.

Leidenfrost
Johann Gottlob.

Geboren am 24. November 1715 zu Rosperwenda in der Grafschaft Stolberg; gestorben in Duisburg am 2. Dezember 1794. Er studierte in Gießen, Leipzig, Halle, war seit 1743 Professor an der Universität Duisburg.

E. Drude.

Leistung.

Leistung oder Effekt ist die Arbeit in der Zeiteinheit (vgl. den Artikel „Arbeit" Abschnitte 4 und 5). Der Begriff wird wesentlich in der Maschinentechnik gebraucht. Die zahlenmäßige Angabe der Leistung einer Maschine in Pferdestärken oder Kilowatt ist ein hauptsächliches Mittel zur Charakterisierung einer bestimmten Maschine. Die Messung der Leistung beruht durchweg auf Kraft- und Geschwindigkeitsmessungen (vgl. den Artikel „Arbeit" Abschnitt 4).

Literatur. *Vgl. den Artikel „Arbeit".*

W. Hort.

Leitgeb
Hubert.

Botaniker. Geboren am 20. Oktober 1835 zu Portendorf in Kärnten, studierte in Graz und darauf unter Unger in Wien Naturwissenschaften, besonders Botanik, und wurde 1856 Lehrer für Naturgeschichte am Gymnasium in Cilli (Steiermark). Von 1859 ab wirkte er in gleicher Eigenschaft in Görz. Im Jahre 1863 begab er sich auf Grund eines Stipendiums nach München, wo er durch Nägeli in entwickelungsgeschichtliche und Scheitelzellstudien eingeführt wurde, denen er später sich auch hauptsächlich widmete. Nach seiner Rückkehr wirkte er noch kurze Zeit am Linzer und von 1866 ab am Gymnasium zu Graz, wo er sich alsbald an der Universität als Privatdozent für Botanik habilitierte. 1867 erfolgte ebendort seine Ernennung zum außerordentlichen, 1869 zum ordentlichen Professor der Botanik. Er starb dort am 5. April 1888. Sein eigentliches Arbeitsgebiet war die

Entwickelungsgeschichte der Laub- und namentlich der Lebermoose, die er eingehend erforschte. Von 1874 bis 1881 erschienen in 6 Heften (Graz) seine morphologisch-entwickelungsgeschichtlichen Untersuchungen über die Lebermoose, in denen die natürlichen Verwandtschaftsverhältnisse und die Phylogenie dieser Gruppe auf Grund sorgfältiger Detailstudien klargelegt wurde. Außerdem sind zu erwähnen seine Abhandlungen zur Embryologie der Farne (1878), Studien über Entwickelung der Farne (1879), worin u. a. die Rolle einiger physiologischer Faktoren in der Entwickelung dieser Pflanzen untersucht wurde, und (1884) die Arbeit „Ueber Bau und Entwickelung der Sporenhäute". 1887 erschien das erste, 1888 das zweite Heft der Mitteilungen aus dem botanischen Institute zu Graz, die Beiträge zur Physiologie der Spaltöffnungen und zwei andere Arbeiten des Herausgebers, Leitgeb, enthielten.

Literatur. *Haberlandt in Ber. d. Deutsch. Bot. Gesellsch., Bd. VI (1886) S. XXXIX.*

A. Ruhland.

Lemery
Nicolas.

Er wurde 1645 in Rouen geboren und ist 1715 nach einem sehr wechselvollen, durch konfessionelle Wirren stark getrübten Leben zu Paris gestorben, wo er den größeren Teil seines Lebens als Apotheker und Arzt, auch Mitglied der Französischen Akademie, zugebracht hat. Seine für jene Zeit ausgebreiteten chemischen Kenntnisse kamen ihm besonders zu statten bei seiner Lehrtätigkeit und bei der Abfassung seines Werkes Cours de Chymie, welches zuerst 1675 erschien, lange Zeit noch als das beste Lehrbuch der Chemie galt und bis zum Tode des Verfassers dreizehn Auflagen erlebte. Seine Experimentaluntersuchungen sind von untergeordneter Bedeutung; sie sind in den Memoires de l'académie française veröffentlicht.

E. von Meyer.

Lenz
Heinrich Friedrich Emil.

Geboren am 12. Februar 1804 in Dorpat; gestorben am 10. Februar 1865 in Rom. Er studierte in Dorpat zunächst Theologie, dann Physik, machte 1823 bis 1826 die Kotzebuesche Expedition mit, wurde 1834 Professor an der Universität Petersburg und Mitglied der Akademie der Wissenschaften daselbst.

E. Drude.

Leonhard
Carl Caesar von.

Geboren am 12. September 1779 zu Rumpenheim bei Hanau; gestorben am 23. Januar 1862 zu Heidelberg. Frühzeitig verwaist, erhielt er zunächst eine lückenhafte Bildung, die er erst später vervollständigte. Er studierte 1797 bis 1799 in Marburg und Göttingen (bei Blumenbach) Cameralia und Mineralogie. Da er frühzeitig heiratete, nahm er eine Assessorstelle bei der Landessteuerdirektion zu Hanau an. Die mineralogischen Studien setzte er durch brieflichen Verkehr mit Werner, Voigt, v. Buch, Goethe u. a., durch Reisen nach Thüringen und Sachsen, in die österreichischen Alpen und das Salzkammergut fort. Er wurde auch bald durch seine mineralogischen Veröffentlichungen bekannt. 1809 wurde er zum Kammerrat und Referenten für das Bergfach ernannt, 1810 bei Errichtung des Großherzogtums Frankfurt von Dalberg an die Spitze der Domänenverwaltung berufen und 1813 zum Geheimen Rat ernannt. Nach 1813 wurde er aller seiner Würden beraubt und folgte 1815 gern einem Rufe Max I. an die Akademie nach München, die er 1818 schon wieder verließ, um in Heidelberg die Professur für Mineralogie zu übernehmen. Seit seinem Rücktritt 1860 nahmen seine Kräfte schnell ab.

Leonhard hat sich weniger durch selbständige Forschungen ausgezeichnet als durch Verallgemeinerung und Verbreitung der geognostischen Wissenschaft wie kaum ein anderer verdient gemacht. Unvergänglich ist sein Name verbunden mit der Schaffung unseres heutigen Zentralorgans für die Mineralogie, durch die Gründung des „Taschenbuchs für die gesamte Mineralogie" (1807 bis 1829 fortgesetzt). 1830 mit Bronn als „Jahrbuch für Mineralogie, Geognosie und Petrefaktenkunde" herausgegeben, erscheint es seit 1833 unter dem Titel „Neues Jahrbuch für Mineralogie, Geognosie und Petrefaktenkunde".

Ein ausführliches Verzeichnis seiner Schriften findet sich in Poggendorffs Annalen 1 1427 und 38 I 796; hier seien folgende Werke genannt: 1805 bis 1810 Handbuch der allgemeinen topographischen Mineralogie (neptunistisch); 1812 Formverhältnis und Gruppierung der Gebirge (mit P. C. Jassoy); 1818 Zur Naturgeschichte der Vulkane; 1822 Handbuch der Oryctognosie; 1823 Charakteristik der Felsarten (1. Petrographie. Vgl. Zittel Gesch. d. Geologie S. 727); 1825 Naturgeschichte der Mineralien; 1831 deren 2. Aufl. als Grundzüge der Geognostik und Geologie; 1831/32 Die Basaltgebilde (vulkanistisch); 1833 bis 1844 Populäre Geologie oder Naturgeschichte der Erde (5 Bde); 1838 Lehrbuch der Geognostik und Geologie; 1858 Die Hüttenerzeugnisse als Stützpunkte geologischer Hypothesen. Außer einer Selbstbiographie (s. u.) sind von Leonhard auch Versuche auf belletristischem Gebiet zu erwähnen.

Literatur. *v. Leonhard, Aus meiner Zeit und meinem Leben (1844—1846). — Allg. Deutsche Biogr. 18 S. 308—11.*

K. Spangenberg.

Leptocardia

Röhrenherzen, Acrania, die durch den Besitz eines röhrenförmigen Herzens ausgezeichnete niederste Abteilung der Wirbeltiere (vgl. den Artikel „Amphioxus“).

Leuchten.

Man unterscheidet „thermaktines“ oder „reguläres“ Leuchten, bei dem ausschließlich Wärme in strahlende Energie umgewandelt wird, und „allaktines“ oder „irreguläres“ Leuchten („Lumineszenz“), bei dem nicht oder nicht ausschließlich Wärme, sondern andere Energiearten (chemische, elektrische Energie usw.) in Strahlung umgesetzt wird. Vgl. die Artikel „Strahlung“, „Strahlungsumformungen“, „Lumineszenz“, „Fluoreszenz“, „Phosphoreszenz“, „Chemilumineszenz“ und „Lichtproduktion der Organismen“.

Leuchtgas.

1. Allgemeines. 2. Steinkohlengas. 3. Oelgas. 4. Blaugas. 5. Karburiertes Wassergas. 6. Luftgas. 7. Koksofen-Leuchtgas. 8. Schwelgas. 9. Blasengas. 10. Torfgas und Holzgas.

1. Allgemeines. Leuchtgas im weitesten Sinne des Wortes ist jedes mit leuchtender Flamme brennbare Gas, Gasgemisch oder Gemisch von Gasen und Dämpfen, das im Fabrikmaßstab als Haupt- oder Nebenerzeugnis gewonnen und zur Beleuchtung, gegebenenfalls auch zum Kochen, Heizen und zur Krafterzeugung benutzt wird. Als Leuchtgas sind anzusehen: Steinkohlengas, Oelgas, Karburiertes Wassergas, Acetylen und Luftgas; ferner zählen bedingt dazu Koksofengas, Schwelgas und Blasengas. Man erzeugt das Leuchtgas für die Zwecke der öffentlichen Beleuchtung und für den Verkauf an Private in örtlichen Monopolbetrieben, den Gaswerken, die meist im Besitz von Gemeinden, seltener in Privatbesitz sind. Vereinzelt kommen Gaswerke vor, deren Gas nur von den Besitzern selbst verbraucht wird z. B. die Gaswerke des Eisenbahnfiskus und die großer Fabriken. Deutschland besitzt 1245 Gaswerke zu öffentlichen Zwecken, das darin festgelegte Kapital beträgt etwa 1300 Millionen Mk., die jährliche Gaserzeugung etwa 2 Milliarden cbm. Der größte Teil dieses Gases besteht aus Steinkohlen- und Wassergas.

2. Steinkohlengas. Die Geschichte des Steinkohlengases reicht bis zum Anfang des 18. Jahrhunderts zurück (Hales; Clayton u. a.); doch ist als wirklicher Erfinder der Gasbeleuchtung erst Murdoch (geb. 1754 zu Old Cumnock) anzusehen. 1802 wurde das Gaslicht zum erstenmal öffentlich vorgeführt und zwar in Birmingham; 1814 wurde die erste Straßenbeleuchtung in St. Margareths London eröffnet. Deutschland erhielt 1826 die erste öffentliche Gasbeleuchtung in Berlin und Hannover. Um 1850 begann man, das Gas zum Kochen und Heizen zu verwenden; 1860 wurde die Gaskraftmaschinen durch Hugon und Lenoir erfunden.

Den Rohstoff für die Gasbereitung bildet die sogenannte Gaskohle, als welche man gewöhnlich mittelalte Steinkohlen aus Westfalen, Schlesien und England, in seltenen Fällen auch ältere Braunkohlen verwendet. Die Zusammensetzung der gebräuchlichen Gassteinkohlen schwankt, auf aschefreie Substanz berechnet, zwischen folgenden Grenzen:

Gaskohle aus	100 Teile wasser- und aschefreie Kohle enthalten				
	Kohlenstoff	Sauerstoff	Wasserstoff	Schwefel	Stickstoff
England	75,3—86,2	5,5—17,2	3,2—5,9	1,0—3,9	1,1—1,9
Westfalen . . .	81,2—84,6	7,6—10,5	4,3—5,0	0,7—2,7	1,4—1,9
Schlesien	75,3—86,2	6,3—15,6	3,5—5,9	0,8—2,8	1,0—1,8

Aus der Zusammensetzung der Kohle läßt sich kein Schluß auf den Vergasungswert ziehen; dieser hängt vielmehr von der Natur des Bitumens ab; über diese ist jedoch zurzeit nur wenig bekannt. Man stellt den Vergasungswert daher lediglich durch Probevergasung fest. Die Gaskohle ist eine Uebergangsform und noch in der Umbildung begriffen; manche ihrer Arten neigen daher zur Selbstentzündung. Diese Neigung ist um so größer, je mehr ungesättigte Verbindungen und Pyrit die Kohle enthält und je kleinstückiger die Kohle ist (Oberflächenanziehung).

Das Steinkohlengas wird durch Erhitzen der Gaskohle unter Luftabschluß, durch trockene Destillation in feuerfesten Gefäßen von Röhren- oder Kammerform und einem Fassungsvermögen von 150 bis 8000 kg Kohle hergestellt. Die Destil-

lationstemperatur beträgt 1000 bis 1300°, die Destillationszeit 4 bis 24 Stunden; die Kohle geht dabei in Gas, wässerige Flüssigkeit (Gaswasser), ölige Flüssigkeit (Teer) und festen Rückstand (Koks) über. Der Destillationsvorgang hat viel Aehnlichkeit mit dem sich über Jahrtausende erstreckenden Umwandlungsvorgang der Kohle im Flöz und läuft wie dieser auf eine Anreicherung des Kohlenstoffs im festen Rückstand auf Kosten der anderen Elemente hinaus. Die Zersetzung der Kohle macht sich zuerst bei 200° durch Wasserabspaltung bemerkbar (Börnstein); bei 250° bis 300° treten neben Wasser ölige Destillate auf, bei 350 bis 450° beginnt die Entwickelung brennbarer Gase. Als ursprüngliche Zerfallsprodukte bilden sich neben Wasser Olefine, Paraffine, komplizierte aromatische Verbindungen, Pyridinbasen, Ammoniak, Schwefelwasserstoff, Kohlendioxyd und etwas freier Wasserstoff. Da die Kohle aber in die glühenden Destillationsgefäße eingebracht wird, unterliegen diese ursprünglichen Produkte dem Einfluß der glühenden Wände und der äußeren glühenden Koksschicht und in den Destillaten finden sich daher nur die Erzeugnisse von Vorgängen zweiter und dritter Ordnung. Es sind dies neben Methan, Benzol, Naphtalin, Anthrazen, Pyridin, Phenol und viele andere aromatische Verbindungen, Ammoniak, Cyanwasserstoff, Schwefelwasserstoff, Schwefelkohlenstoff, Wasserstoff, Kohlenstoff und Stickstoff. Wasser tritt hauptsächlich zu Beginn der Entgasung auf, später geht es zum größten Teil in Wasser-

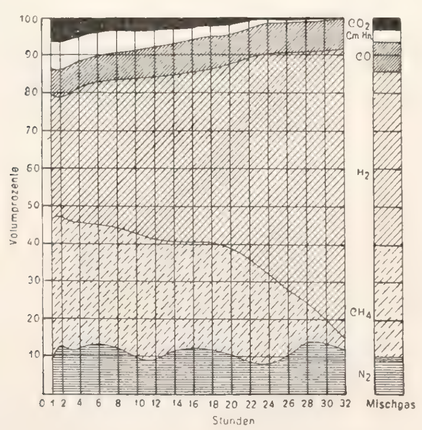


Fig. 1. Zusammensetzung von Koksofengas aus Ruhrkohlen während der Entgasung.

stoff und Kohlenoxyd (Wassergas) über. Je höher die Destillationstemperatur ist, um so einfacher sind die in den Destillaten enthaltenen aromatischen Verbindungen (an aliphatischen ist nur Methan vorhanden) und um so mehr herrschen die freien Elemente vor. Dies sieht man besonders an der Zusammensetzung des Gases während des Vordringens der Wärme ins Innere der Kohle, also während des Vorschreitens der Entgasungszeit. Figur 1 gibt die einschlägigen Verhältnisse für einen Kammerofen mit 32stündiger Entgasungszeit wieder (nach C. Schmidt). Vom Stickstoff der Kohle findet sich nur ein sehr kleiner Teil etwa 1 bis 2% in Form aromatischer Verbindungen wieder, die Hauptmenge ist als Element, als Ammoniak und als Cyanwasserstoff vorhanden; dieser ist aus dem Ammoniak durch den Einfluß glühenden Kohlenstoffs entstanden. Das Ammoniak tritt hauptsächlich zu Beginn der Entgasung auf, mit steigender Temperatur geht es mehr und mehr in Cyanwasserstoff oder in Stickstoff und Wasserstoff über, im Mittel werden 10 bis 20% des Ammoniaks in Cyanwasserstoff verwandelt, und 13 bis 30% des Gesamtstickstoffs treten als Ammoniak und als Cyanwasserstoff auf. Ueber die Entwickelung beider während der Entgasung gibt die Darstellung in Figur 2 (nach Witzeck) Auskunft. Der Schwefel verhält

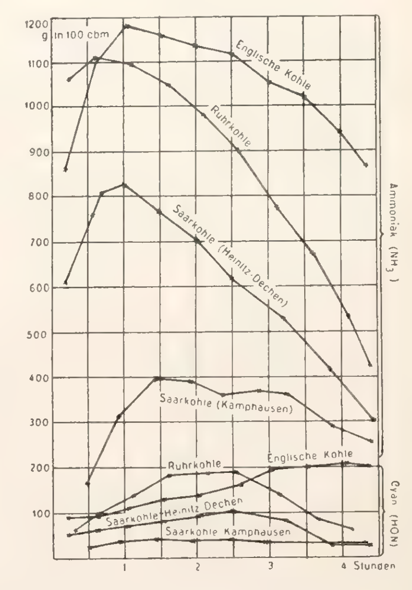


Fig. 2. Entwickelung von Ammoniak und Cyan während der Entgasung.

sich dem Stickstoff sehr ähnlich, insofern er nur spurenweise als aromatische Verbindung und hauptsächlich verbunden mit Wasserstoff und Kohlenstoff auftritt. Zu Anfang macht sich vornehmlich Schwefelwasserstoff bemerklich. Je dicker die glühende Koksschicht wird, um so mehr tritt Schwefelkohlenstoff auf. Figur 3 zeigt den

Verlauf der Entwickelung dieser beiden Schwefelverbindungen während der Destillation (nach W i t z e c k). Vom flüchtigen Gesamtschwefel gehen durchschnittlich 94 bis 97 % in Schwefelwasserstoff und 6 bis 3 % in Schwefelkohlenstoff über.

Die Art der Destillationsprodukte hängt nur von der Destillationstemperatur, nicht von der Art der vergasten Kohle ab, diese übt jedoch einen wesentlichen Einfluß auf die Mengenverhältnisse aus. Als G r e n z z a h l e n für die hauptsächlichsten Kohlenarten sind folgende anzusehen:

Kohlenart	100 kg wasser- und aschefreie Substanz liefern			
	Gas in cbm	Teer in kg	Gaswasser in kg	Koks in kg
Westfälisch	37,4—41,6	4,2—6,6	4,2—6,6	63,7—70,9
Schlesisch	35,2—40,1	3,2—9,0	2,5—12,8	58,7—78,0
Englisch	32,9—39,7	5,2—8,0	2,3—13,3	59,9—75,7

und bezüglich des Stickstoffs findet man, daß vom Gesamtstickstoff der Kohle übergehen

Kohlenart	in Ammoniak	in Cyanwasserstoff	nutzbar im ganzen
Westfälisch	11,3—17,0 %	2,3—4,2 %	13,8—20,1 %
Schlesisch	11,1—20,4 „	1,6—3,0 „	13,1—23,2 „
Englisch	11,2—25,0 „	1,7—4,4 „	13,4—27,0 „

Die Menge des nutzbaren Stickstoffs ist von der Gesamtmenge scheinbar nicht abhängig. Die Art der Kohle beeinflußt auch die Verteilung der latenten Energie, der V e r b r e n n u n g s w ä r m e der Kohle, in den Destillationsprodukten und zwar derart, daß je älter die Kohle ist, um so höher die Verbrennungswärme des festen Rückstandes ausfällt. Eine Uebersicht über diese Verhältnisse gibt Figur 4 auf Seite 170 (nach C o n s t a m und K o l b e).

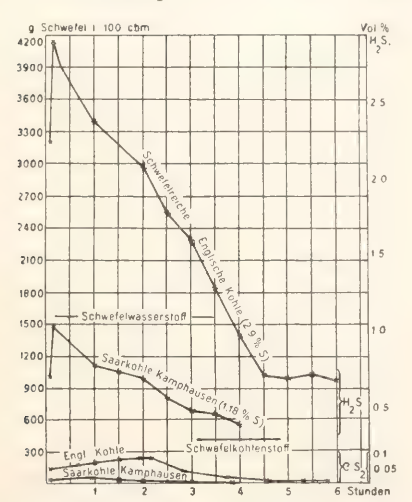


Fig. 3. Entwickelung der Schwefelverbindungen während der Entgasung.

Das aus den Entgasungsgefäßen austretende Gemisch der Destillationsprodukte, das sogenannte r o h e S t e i n k o h l e n g a s ist etwa 300° warm und braungelb. Etwa ²/₃ seines Rauminhalts oder die Hälfte seines Gewichtes besteht aus wirklichem Leuchtgas, der Rest sind Verunreinigungen nämlich Wasser- und Teerdampf, Ammoniak, Cyanwasserstoff und Schwefelverbindungen. Man kühlt das Rohgas mit Luft und Wasser und verdichtet dadurch Wasser- und Teerdampf. Ein Teil des letzteren bleibt nebelförmig und muß durch Stoßverdichtung abgeschieden werden. Teer und Wasser sammelt man in Gruben, wo sie sich den spezifischen Gewichten gemäß übereinander lagern. Das Wasser dient zur Auswaschung des Ammoniaks aus dem Gas, der Teer wird an Teerdestillationen u. dgl. verkauft oder verfeuert.

Der S t e i n k o h l e n t e e r ist tiefschwarz und dickflüssig, wiegt 1,1 bis 1,2 und riecht nach aromatischen Kohlenwasserstoffen, Phenolen und Ammoniak. Seine Dickflüssigkeit rührt vom Gehalt an Pech und festem Kohlenstoff her und steigt mit zunehmender Entgasungstemperatur. Im übrigen hängt sie von der Kohlenart ab. Englische und westfälische Kohlen ergeben dickflüssigere Teere als schlesische und schottische Kohlen. Gasteer hat z. B. folgende Zusammensetzung C = 77,6 %; H = 6,3 %; N = 1,0 %; S = 0,6 %; O = 14,5 % und enthält 7 bis 33 % freien Kohlenstoff. Seine Verbrennungswärme beträgt 8500 bis 8700 W.E., der Heizwert 8150 bis 8350 W.E.

Nach der Abscheidung des Teers muß man das Gas von N a p h t a l i n d a m p f befreien, was durch Waschen mit schweren Teerölen geschieht. Kohle liefert beim Ent-

gasen etwa 300 g Naphtalin für 100 kg. Davon bleiben nach der Teerscheidung etwa 1 g in jedem cbm Gas, was zum Verursachen von Naphtalinverstopfungen im Rohrnetz hinreicht. Als Waschöl benutzt man ein Anthrazenöl mit 3 % Benzolzusatz. Es wiegt bei 15° 1,113 bis 1,117 und wird während des Waschens durch Aufnahme von Kohlenwasserstoffen leichter. Es kann bei gewöhnlicher Temperatur bis zu 40 % Naphtalin in Lösung halten. Gesättigtes wirken, so gehen die unlöslichen Verbindungen mehr und mehr in lösliche über: $Fe(CN)_2 + 4NH_3 + 4HCN = (NH_4)_4Fe(CN)_6$ und $(NH_4)_2 Fe_2 (CN)_6 + 6 NH_3 + 6 (HCN) = 2 (NH_4)_4 Fe(CN)_6$.

Die Waschung wird gewöhnlich unterbrochen, bevor der zweite Vorgang größeren Umfang erreicht hat. Das Ergebnis ist dunkelbrauner Cyanschlamm, dessen Cyangehalt 18 bis 20 % $K_4Fe(CN)_6$ entspricht. Man fällt das lösliche Cyan des

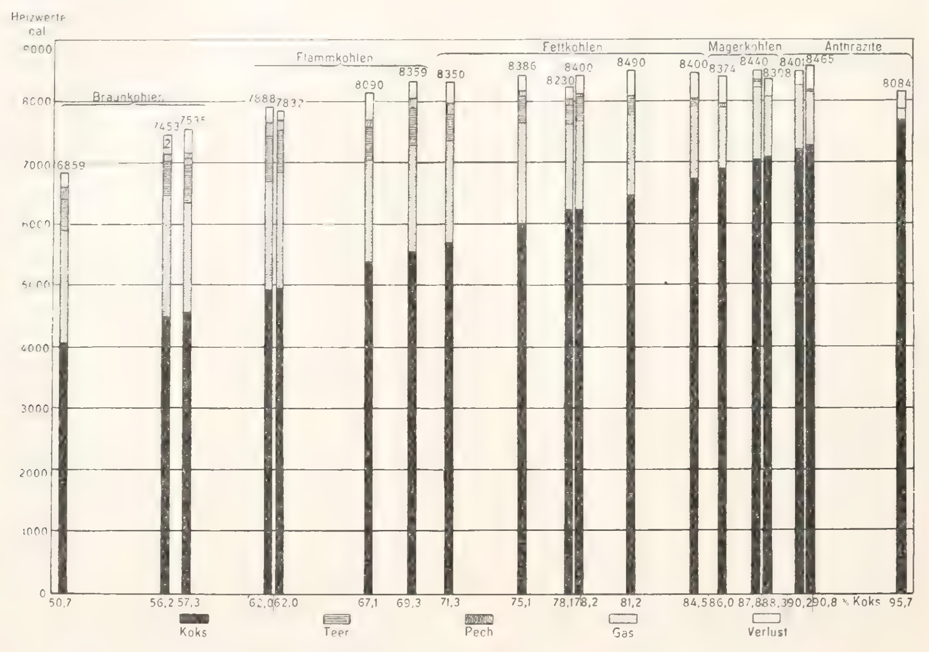


Fig. 4. Verteilung des Heizwertes der Kohle in den Vergasungsprodukten.

Waschöl gibt jedoch an naphtalinfreies Gas Naphtalin ab.

Nach dem Naphtalin wird der Cyanwasserstoff beseitigt. Man wäscht ihn entweder für sich als Ferro- oder Sulfocyanverbindung aus oder bindet ihn bei der Reinigung des Gases von Schwefel auf trockenem Wege an Eisen. Die Auswaschung als Ferrocyanverbindung geschieht entweder durch Behandeln mit konzentrierter Eisenvitriollösung (Bueb) oder durch Waschen mit einer Aufschwemmung von Eisenoxydulhydrat in Pottaschelösung (Foulis). Da das Gas noch Ammoniak und Schwefelwasserstoff enthält, wird aus der Eisenvitriollösung Schwefeleisen abgeschieden, das den Cyanwasserstoff nach folgender Gleichung in unlöslicher Form bindet: $FeS + 2 NH_3 + 2 HCN = Fe(CN)_2 + (NH_4)_2S$ und $2 FeS + 6 NH_3 + 6 HCN = (NH_4)_2 Fe_2 (CN)_6 + 2 (NH_4)_2S$. Läßt man das cyanhaltige Gas länger ein- Schlamms mit Eisenvitriol, kocht das Gemisch und preßt es ab. Das Preßgut ist Blaukuchen, der trocken etwa 70 % Berliner Blau und 11 bis 12 % Ammoniak enthält. Er wird an Blutlaugensalzfabriken verkauft. Die Filterpreßlauge enthält 2 % Ammoniak als Sulfat und wird in der Ammoniakfabrik (des Gaswerks) auf festes Sulfat verarbeitet.

Bei der Auswaschung mit Potaschelösung und Eisenoxydulhydrat spielt sich derselbe Vorgang wie beschrieben ab, nur erhält man das Cyan als Ferrocyankalium in Lösung und etwas davon als $(NH_4)_2 Fe_2(CN)_6$ und $K_2Fe_2(CN)_6$ in Schlammform. Die Lösung wird durch Auskochen von Ammoniak befreit, filtriert und zur Kristallisation eingeengt. Den Filterkuchen schließt man mit KOH auf und gewinnt dadurch nochmals etwas $K_4Fe(CN)_6$. Anstatt des Kalium-Karbonats wird häufig Kalkmilch zum Auswaschen des Cyans benutzt. Das entstandene

Ferrocyancalcium ist löslich und wird in das Kaliumsalz verwandelt.

Die Auswaschung als Schwefelcyan wird mit wässerigen Aufschwemmungen von Schwefelblumen ausgeführt. Man erhält Rhodanammonium:
$(NH_4)_2 S_2 + NH_3 + HCN = (NH_4)CNS + (NH_4)_2 S$. Das Salz wird durch Kristallisation gewonnen. In manchen Fällen setzt man der Waschflüssigkeit noch Kalk- oder Magnesiamilch zu und erhält dann das entsprechende Rhodansalz. Die Rhodanverfahren sind in Deutschland nicht gebräuchlich.

Das Ammoniak gewinnt man aus dem Gas durch Waschen mit Wasser oder mit Schwefelsäure. Zur Wasserwaschung verwendet man den wässerigen Kühlerablauf von der Kühlung des Rohgases und zum Schluß ein wenig reines Wasser. Das Ergebnis ist sogenanntes Gaswasser, das in frischem Zustand farblos ist, an der Luft aber schnell nachdunkelt und stark nach Ammoniak, Schwefelammonium und Teer riecht. Es enthält im Liter 10 bis 30 g Ammoniak in Form von Karbonat, Sulfid, Thiosulfat, Sulfat, Rhodanid, Chlorid und Ferrocyanid, außerdem sind noch Pyridinbasen, Phenole und aromatische Kohlenwasserstoffe vorhanden. Die Menge der Schwefelverbindungen richtet sich nach der entgasten Kohlenart und nach der Destillationstemperatur. Enthält das Gas bei der Wäsche Luft, so steigt der Gehalt des Gaswassers an Säuren des Schwefels, dasselbe tritt beim Lagern des Gaswassers an der Luft ein. Der Gehalt an Cyanverbindungen richtet sich danach, ob das Cyan vor der Ammoniakwäsche entfernt ist oder nicht. Der Chlorgehalt ist vom Chlorgehalt der Kohle (aus dem Grubenwasser stammend) abhängig. Das Gaswasser wird entweder mit Schwefelsäure eingedampft und ergibt dann Ammoniumsulfat oder es wird destilliert. In diesem Falle zersetzt man zunächst das Ammoniumkarbonat und Sulfhydrat durch Erwärmen des Wassers auf 90 bis 95° und beseitigt das freiwerdende Kohlendioxyd und den Schwefelwasserstoff, darauf destilliert man unter Kalkmilchzusatz. Verdichtet man das übergehende Gemisch von Ammoniak und Dampf, so erhält man sogenanntes verdichtetes Gaswasser mit 18 bis 25 % Ammoniak; leitet man es in Schwefelsäure, gewinnt man festes Ammoniumsulfat. Reines Ammoniakgas stellt man durch Kühlen des Gemisches mit Wasser, durch Waschen mit Kalkmilch, Natronlauge und Paraffinöl und durch Behandeln mit Holzkohle dar. Es wird in destilliertem Wasser zu Salmiakgeist mit 25 bis 35% Ammoniak absorbiert oder durch Pumpen zu flüssigem Ammoniak verdichtet. Das Abwasser der Destillierapparate enthält Rhodancalcium und Phenole und ist in konzentriertem Zustand ein Fischgift.

Der Auswaschung des Ammoniaks mit Schwefelsäure wird das Gas in heißem Zustand vor oder nach der Entteerung unterworfen. Man gewinnt dabei Ammoniumsulfat. Deutschlands Ammoniumsulfaterzeugung betrug 1909 323 000 Tonnen (zu 1000 kg), davon entfielen auf Gaswerke etwa 40 000 Tonnen. Großbritannien lieferte zur gleichen Zeit 348 000 Tonnen, wozu die Gaswerke 171 000 Tonnen beitrugen.

Der letzte Reinigungsvorgang, den das Gas durchzumachen hat, ist die Beseitigung des Schwefelwasserstoffs, die, falls man keine Cyanwäsche besitzt, mit der Absorption des Cyanwasserstoffs verbunden ist. Das Verfahren besteht in der Behandlung des Gases mit angefeuchteten eisenoxydhydrathaltigen Reinigungsmassen. Als solche kommen natürliche Raseneisenerze mit 50 bis 80 % Eisenoxyd (in der Trockensubstanz) oder künstliche Massen (von der Bauxitverarbeitung stammend) mit dem gleichen Eisengehalt, die außerdem meist noch Alkali enthalten, zur Anwendung. Die Bindung des Schwefelwasserstoffs geschieht in folgender Weise $Fe_2 (OH)_6 + 3 H_2S = Fe_2S_3 + 6H_2O$. Ist Ammoniak oder eine andere Base zugegen, so verläuft der Vorgang nach der Gleichung:
$Fe_2(OH)_6 + 3 H_2S = 2 FeS + S + 6H_2O$. Für je 1 cbm Schwefelwasserstoff (1520 g) werden dabei 222 W.E. frei. Die gesättigte Masse ist schwarz. Sie wird angefeuchtet an der Luft ausgebreitet und durch Oxydation in folgender Weise umgewandelt: $2 Fe_2 S_3 + 3 O_2 + 6 H_2O = 2 Fe_2(OH)_6 + 6 S$ und $4 FeS + 3O_2 + 6 H_2O = 2 Fe_2 (OH)_6 + 4 S$. Dabei werden für die 1 cbm Schwefelwasserstoff entsprechende Schwefelmenge 2160 W.E. frei. Der Vorgang, die sogenannte Wiederbelebung ist daher mit starker Wärmeentwickelung verbunden, die zur Entzündung des abgeschiedenen Schwefels führen kann. Die wiederbelebte Masse läßt sich von neuem zur Reinigung benutzen. Sobald sie 40 bis 50 % freien Schwefel enthält, wird sie aus dem Betrieb entfernt. In der Praxis vereinigt man Absorption und Wiederbelebung oft zu einem Arbeitsgang, indem man dem Gas vor der Reinigung 1 bis 1,5 % Luft zusetzt.

Enthält das Gas Cyanwasserstoff, so wird dieser von den Eisenoxydulverbindungen $Fe(OH)_2$ und FeS absorbiert:
$Fe(OH)_2 + 2 HCN = Fe(CN)_2 + 2 H_2O$ und $FeS + 2HCN = Fe (CN)_2 + H_2S$. Bei der Wiederbelebung entsteht aus $Fe(CN)_2$ Berliner Blau:
$9 Fe (CN)_2 + 3O + 3H_2O = Fe_4 [Fe(CN)_6]_3 + Fe_2 (OH)_6$. Ein Teil des Cyanwasserstoffs geht bei der Absorption in Rhodan

über und zwar um so mehr, je mehr Luft das Gas enthält. Ausgebrauchte Reinigungsmasse aus Gaswerken ohne Cyanwäsche enthält bis zu 15 % Berliner Blau. Sie wird von Cyanfabriken verarbeitet.

Der im Gas enthaltene Schwefelkohlenstoff läßt sich durch Behandlung mit Schwefelcalcium (als Sulfokarbonat), mit Anilin in Alkohol (als Sulfokarbanilid), mit Phenylhydrazin (als phenylsulfokarbazinsaures Phenylhydrazin) und mit Holzkohle (durch Oberflächenanziehung) entfernen, doch macht man davon in Deutschland keinen Gebrauch. Die Behandlung mit Schwefelcalcium wird in England oft angewandt.

Das gereinigte Steinkohlengas ist farblos und riecht ätherisch. Es wiegt 0,35 bis 0,48 und ist um so schwerer, je weniger Wasserstoff und je mehr schwere Kohlenwasserstoffe es enthält. Beispiele für die Zusammensetzung von reinem Steinkohlengas:

	Kohlendioxyd	Schwere Kohlenwasserstoffe	Sauerstoff	Kohlenoxyd	Wasserstoff	Methan	Stickstoff	Spezifisches Gewicht	Lichtstärke für 150 l Gas	Verbrennungswärme für 1 cbm
Leichtes Gas . . .	1,8	3,9	0,5	7,9	48,6	35,2	2,1	0,41	18,5	5480
Schweres Gas . . .	2,0	4,8	0,4	7,7	49,6	33,9	2,5	0,47	14,5	5700

Als Grenzzahlen für die Verbrennungswärme gelten 4800 bis 6000 W.E. und für die Lichtstärke im Argandbrenner 10 bis 20 H.K. bei 150 l Gasverbrauch. Gut gereinigtes Gas ist völlig frei von Teer und Schwefelwasserstoff. An Schwefel als organische Verbindung dürfen bis 100 g, an Cyanwasserstoff 10 bis 20 g, an Ammoniak 0,1 bis 1,0 g in 100 cbm enthalten sein. Beim Stehen über Wasser werden die schweren Kohlenwasserstoffe allmählich absorbiert und der Wert des Gases sinkt. Leuchtgas-Luftgemische sind explosiv, wenn sie 7,9 bis 19,1 % Leuchtgas enthalten oder wenn auf 1 Teil Leuchtgas 11,7 bis 4,24 Teile Luft entfallen.

Der Steinkohlenkoks ist porös, dunkel- bis silbergrau, von metallischem Aussehen und sehr hart. Er stellt eine hochmolekulare Verbindung von Kohlenstoff mit Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel dar, der die anorganischen Bestandteile der Kohle beigemengt sind. Der Koks ist um so reicher an Kohlenstoff, je älter die entgaste Kohle und je höher die Entgasungstemperatur war. Grenzzahlen für die Zusammensetzung der Wasser- und aschefreien Kokssubstanz: C = 92,8 bis 96,1 %, H = 0,6 bis 1,2 %; O = 0,9 bis 3,6 %; N = 1,0 bis 1,7 %; S = 0,9 bis 1,6 %; Verbrennungswärme von 1 kg 7700 bis 8000 W.E. Die physikalischen Eigenschaften Härte, Porosität und Festigkeit wechseln mit der Art, der Korngröße und dem Feuchtigkeitsgehalt der entgasten Kohle. Je feiner das Korn und je feuchter die Kohle, um so fester und dichter, also wertvoller wird der Koks. Der Gaskoks wird als Hausbrand, zur Kessel- und Zentralheizung u. dgl. benützt. Den Grus kann man mit Teerpech gemischt zu Preßkohlen formen.

3. **Das Oelgas** ist 1815 von Taylor zum ersten Male dargestellt worden. Nach sehr kurzer Blüte geriet es wieder in Vergessenheit, bis Pintsch es um 1870 als Eisenbahnwagen- und später als Seezeichenbeleuchtung einführte. Man stellt das Oelgas durch Zersetzen von Oeldämpfen in eisernen Retorten oder feuerfesten Schächten bei heller Rotglut (750 bis 800°) dar. Als Rohstoff dienten früher Pflanzenöle, heute benutzt man Petroleumdestillate, Braunkohlen- und Schieferteeröle. In Deutschland werden aus Zollrücksichten keine Petroleumöle, sondern vorwiegend Thüringer Braunkohlenteer-Gasöle verwendet. Diese Oele sind rotbraun mit blauer Fluoreszenz, wiegen 0,88 bis 0,90 und sieden zwischen 250 und 360°. Sie geben um so mehr und besseres Gas, je mehr Paraffinkohlenwasserstoffe sie enthalten. Die Olefin- und Acetylenkohlenwasserstoffe liefern weniger Gas. Am wenigsten erhält man bei der Vergasung von Naphtenen. Innerhalb jeder Gruppe sind die niedrigsten Glieder stets am ergiebigsten. Für alle Oele gilt wie für die Kohlen die Regel, daß die Gasmenge mit der Vergasungstemperatur steigt, während die Verbrennungswärme des Gases gleichzeitig fällt. Bei der Vergasung zerfällt das Oel in Gas und Teer neben etwas Wasser und Koks. Im Mittel erhält man aus 100 kg 50 bis 55 cbm Gas und 25 bis 30 kg Teer. Das Rohgas wird durch Kühlung und Stoßverdichtung von Wasser und Teer, durch Raseneisenerz von Schwefelwasserstoff befreit.

Das gereinigte Oelgas hat etwa folgende Zusammensetzung: Schwere Kohlenwasserstoffe 33 %, Methan 46 %, Wasserstoff 15 %, Kohlenoxyd 2,5 %, Kohlen-

dioxyd 1 %, Sauerstoff 0,5 %, Stickstoff 2 %. Die Verbrennungswärme von 1 cbm beträgt 10 000 bis 12 000 W.E., die Lichtstärke 8 bis 12 H.K. für 35 l. Oelgas wiegt 0,6 bis 0,9 und enthält 25 bis 30 g Schwefel in 100 cbm. Oelgasgemische mit 6 bis 18 Teilen Luft sind explosiv. Zum Gebrauch wird das Oelgas auf 10 kg/qcm verdichtet, wobei sich für 100 cbm 13 bis 15 l flüssige Kohlenwasserstoffe abscheiden. Diese bestehen aus 70 % Benzol, 15 % Toluol, 5 % höheren aromatischen Homologen und 10 % Olefinen.

4. Das Blaugas. Eine Abart des Oelgases ist das Blaugas, das durch Oelvergasung bei verhältnismäßig niedriger Temperatur erzeugt und nach der Reinigung durch Verdichtung von aromatischen Kohlenwasserstoffen befreit und bei 100 kg/qcm Druck verflüssigt wird. Aus 100 kg Gasöl erhält man 30 bis 40 kg Blaugas als wasserhelle Flüssigkeit vom spezifischen Gewicht 0,51 und dem Siedepunkt 60 bis 50° unter Null. Die Zusammensetzung des Gases ist z. B.: Olefine 47,6 %; Paraffine 36,2 %; Wasserstoff 6,4 %; Kohlendioxyd 1,8 %; Luft 8,0 %. Das spezifische Gewicht beträgt 0,8 bis 0,85, die Verbrennungswärme etwa 15 000 W.E. für 1 cbm. Blaugasgemische sind explosiv, wenn sie 92 bis 96 % Luft enthalten.

Der Oelgasteer ist dünnflüssiger und leichter als Steinkohlenteer, enthält mehr fette Kohlenwasserstoffe und Anthrazen und weniger freien Kohlenstoff. Seine Verbrennungswärme beträgt für 1 kg 9000 bis 9500 W.E., der Heizwert 8500 bis 9000 W.E. Der Teer wird meist als Treiböl für Dieselmotoren oder als Brennstoff benützt.

5. Das karburierte Wassergas oder Leuchtwassergas ist seit etwa 40 Jahren bekannt. Die erste Anlage wurde 1871 in Phönixville (Nordamerika) von Lowe errichtet. 1890 führte man das Gas in England ein; seit 1900 wird es in Deutschland fabrikmäßig erzeugt. In Amerika dient es als Leuchtgasersatz, etwa 3/4 der gesamten amerikanischen Gaserzeugung bestehen daraus; in Deutschland mischt man es dem Steinkohlengas bei. Zu seiner Erzeugung werden Oeldämpfe in einer Atmosphäre von Blauwassergas bei Temperaturen von 700 bis 800° in feuerfesten Schächten, die mit Schamottesteinen gitterartig ausgefüllt sind, vergast. Als Rohstoffe dienen Gasöle, die bei der Destillation des Rohpetroleums gewonnen werden und zwischen 150 und 360° übergehen. Sie machen etwa 10 % des Rohöls aus, sind weingelb bis tiefbraun und wiegen 0,8 bis 0,9. Das Gasöl ist ein Gemisch gesättigter, ungesättigter und zyklischer Kohlenwasserstoffe der Fettreihe, es enthält 84 bis 87 % C, etwa 12 % H und 0,5 bis 4 % O, S und N. Sein Vergasungswert ist wie bei der Oelgaserzeugung um so größer, je mehr gesättigte Kohlenwasserstoffe es enthält. Bei der Vergasung im Wassergasstrom liefert das Oel 2 bis 5 % Koks, 20 bis 30 % Teer, der Rest ist gasförmig. Vom Heizwert des Oels, der 10 000 bis 11 000 W.E. beträgt, gewinnt man bis zu 80 % in Gasform. Von der reinen Oelvergasung unterscheidet sich die Vergasung im Wassergasstrom dadurch sehr bezeichnend, daß nicht nur eine Spaltung des Oelmoleküls, sondern auch eine Anlagerung von Wasserstoff stattfindet. Der Abbau zu kurzgliedrigen Kohlenwasserstoffen geht weiter als bei der reinen Oelvergasung, daher erhält man um etwa 10 % weniger Teer als bei letzterer, der Koksanfall ist bis zu 50 % kleiner. Jedem Oel kommt in bezug auf die Gasausbeute ein gewisser günstigster Partialdruck des Wasserstoffs zu. Geht man über diesen hinaus, so kommt die Wasserstoffanlagerung dem Teer zugute, dessen Menge dann wieder zunimmt. Die Reinigung des rohen Leuchtwassergases erstreckt sich gewöhnlich nur auf die Entfernung des Teers. Die Schwefelverbindungen werden meist nach Zumischung des Gases zum Steinkohlengas in der bei letzterem beschriebenen Weise entfernt. Die Zusammensetzung des gereinigten Gases richtet sich nach dem Oelaufwand. Karlsruher Leuchtwassergas enthielt z. B. 3,8 % Kohlendioxyd, 10,2 % schwere Kohlenwasserstoffe, 0,1 % Sauerstoff, 26,2 % Kohlenoxyd, 36,9 % Wasserstoff, 19,3 % Methan, 3,5 % Stickstoff, woraus sich eine Verbrennungswärme von etwa 5200 W.E. für 1 cbm ergibt. Das spezifische Gewicht des Gases betrug 0,66.

Der Wassergasteer ist sehr arm an Sauerstoff, aber reich an Kohlenstoff und Wasserstoff. Teer eines galizischen Oeles enthielt z. B. 91,32 % C; 7,41 % H; 1,27 % O + N + S; die Verbrennungswärme betrug 9464, der Heizwert 9085 W.E. Freier Kohlenstoff kommt in dem Teer nur spurenweise vor. Man benützt den Teer zu Feuerungszwecken, als Treiböl und als Naphtalinwaschöl.

6. Luftgas kennt man etwa seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts, es hat aber erst seit Einführung des Auerlichts, also ausgangs des vorigen Jahrhunderts eine nennenswerte Bedeutung und zwar als Ersatz des Steinkohlengases in gewissen Fällen erlangt. In der Praxis kommt es unter mehreren Phantasienamen z. B. Aerogen, Benoidgas, Pentairgas, Kanadolgas usw. vor. Es ist ein auf kaltem Wege, durch Verdunstung hergestelltes Gemisch von Luft mit den Dämpfen leichtflüchtiger Kohlenwasserstoffe. Der Rohstoff ist Petroleum-

Leichtbenzin vom spezifischen Gewicht 0,64 bis 0,68, ein Gemisch von Paraffinen, vornehmlich von Pentan C_5H_{12} und Hexan C_6H_{14} mit einer Verbrennungswärme von etwa 11000 W.E. für 1 kg. Er wird oft als Gasolin, Solin, Benoid-Hexan, Hydririn u. dgl. bezeichnet. Zur Erzeugung des Luftgases führt man Luft über benzinfeuchte Flächen, eine Reinigung des Gases ist nicht erforderlich. Luftgas wiegt 1,1 bis 1,2 und enthält 8 bis 8,5 Volumprozente Benzindampf entsprechend 250 bis 300 g Benzin in 1 cbm. Die Verbrennungswärme beträgt 2750 bis 3300 W.E., der Taupunkt liegt unter Null. Luftgas ist bei 3 bis 5 Volumprozenten Benzindampf explosiv.

7. **Koksofen-Leuchtgas** ist erst seit etwa 4 Jahren in Gebrauch und wird sowohl für sich, als auch im Gemisch mit gewöhnlichem Steinkohlen-Leuchtgas oder mit Leuchtwassergas angewendet. Die seit mehr als 100 Jahren bekannten Koksöfen zur Verkokung grusiger Steinkohle für hüttenmännische Zwecke liefern ein dem Steinkohlenleuchtgas sehr ähnliches Gas, das jedoch in der zweiten Hälfte der Entgasungszeit mit Wasserstoff stark verdünnt und dadurch im Wert herabgesetzt wird (vgl. das Diagramm der Fig. 1). Für die Zwecke der Gasbeleuchtung benützt man daher nur das im ersten Drittel der Entgasungszeit entwickelte Gas. Es deckt sich in seiner Entstehung, Reinigung, Zusammensetzung und seinen Eigenschaften völlig mit dem unter 1 beschriebenen gewöhnlichen Steinkohlengas.

8. **Schwelgas** entsteht als Nebenprodukt bei der trockenen Destillation von Braunkohle und bituminösem Schiefer zum Zweck der Mineralölgewinnung und hat als Leuchtgas nur örtliche Bedeutung. Man destilliert die Kohle bei 400 bis 600° und erhält für 100 kg 13 bis 14 cbm Schwelgas, Schiefer liefern bis zu 30 cbm und mehr, da man heute ihren abgeschwelten Rückstand in Wasserdampf vergast (Wassergas). Schwelgas der sächsisch-thürignischen Industrie enthält im Durchschnitt 10 bis 20 % Kohlendioxyd, 0,1 bis 3 % Sauerstoff, 1 bis 2 % schwere Kohlenwasserstoffe, 5 bis 15 % Kohlenoxyd, 10 bis 25 % Methan, 10 bis 30 % Wasserstoff, 10 bis 30 % Stickstoff, 1 bis 3 % Schwefelwasserstoff. Sein Heizwert beträgt 2000 bis 3600 W.E. Zum Gebrauch als Leuchtgas muß es mit Kalkhydrat von Kohlendioxyd und mit Gasreinigungsmasse von Schwefelwasserstoff befreit werden.

9. **Blasengas** entstammt ebenfalls der Schwelindustrie und ist das Gas, das bei der Destillation der Schwelteere entweicht. Es ist wertvoller als das Schwelgas. Nach Gräfe enthält es z. B. 3 % dampfförmige Kohlenwasserstoffe; 6,8 % schwere Kohlenwasserstoffe; 28,5 % Methan; 32,2 % Aethan; 1,9 % Kohlenoxyd; 4,9 % Wasserstoff; 3,3 % Schwefelwasserstoff; 2,4 % Kohlendioxyd und 3,4 % Sauerstoff bei einem Heizwert von 7000 bis 8000 W.E. Man pflegt es in bekannter Weise von Schwefelwasserstoff zu befreien. Seine Bedeutung ist nicht größer als die des Schwelgases, mit dem man es meistens mischt.

10. **Torfgas und Holzgas** werden bei der trocknen Destillation von Torf und Holz als Nebenerzeugnisse gewonnen. Beispiele ihrer Zusammensetzung (nach Fischer, Kraftgas) sind folgende:

	Torfgas nach Lencauchez	Fichtenholzgas nach Reissig
Schwere Kohlenwasserstoffe	4,0 %	7,7 %
Methan	7,0 „	9,5 „
Kohlenoxyd	30,0 „	61,8 „
Wasserstoff	40,0 „	18,4 „
Kohlendioxyd	14,0 „	2,2 „
Stickstoff	5,0 „	0,4 „

Juon fand in Holzgas bedeutend mehr Kohlendioxyd nämlich bis zu 50 % und darüber. Für Beleuchtungszwecke muß man das Kohlendioxyd ebenso wie etwaige Schwefelverbindungen in bekannter Weise beseitigen. Eigentliches Torfgas kommt sehr selten vor, da man die Torfvergasung meist als Generatorvergasung zum Zweck der Kraftgaserzeugung ausführt. Holzgas wird nur in sehr waldreichen Gegenden z. B. in Rußland, Schweden und Nordamerika bei der Darstellung von Holzkohle für hüttenmännische Zwecke gewonnen und dient großenteils zum Beheizen der Verkohlungsöfen. Beide Gase sind an sich und besonders als Leuchtgase von sehr untergeordneter Bedeutung.

Literatur. *Allgemeines:* ***Schilling,*** *Handbuch der Steinkohlengasbeleuchtung. München 1860. —* ***King,*** *Treatise on Coal Gas. London 1878. —* ***Schäfer,*** *Einrichtung und Betrieb eines Gaswerks. München 1903. —* ***Bertelsmann,*** *Betriebsführung von Gaswerken. Leipzig 1909. —* ***Derselbe,*** *Lehrbuch der Leuchtgasindustrie. Stuttgart 1911. — Zeitschriften: Journal für Gasbeleuchtung und Wasserversorgung, München. Seit 1858. — Wasser und Gas, Oldenburg. Seit 1910. — Journal of Gaslighting, London. Seit 1849. — Journal de l'éclairage au gaz, Paris. Seit 1852. — American Gaslight Journal, New York. Seit 1859. — Rohstoffe:* ***Gleinitz, Fleck und Hartig,*** *Die Steinkohlen Deutschlands und anderer Länder Europas. München 1865. —* ***Muck,*** *Steinkohlenchemie. Bonn 1881. —* ***Scheithauer,*** *Die Fabrikation der Mineralöle. Braunschweig 1895. —* ***Derselbe,*** *Die Schwelteere. Leipzig 1911. — Nebenerzeugnisse:* ***Simmersbach,*** *Grund-*

lagen der Kokechemie. Berlin 1895. — ***Schultz,*** *Die Chemie des Steinkohlenteers. Braunschweig 1900.* — ***Lunge-Köhler,*** *Die Industrie des Steinkohlenteers und Ammoniaks. Braunschweig 1900.* — ***Bertelsmann,*** *Der Stickstoff der Steinkohle. Stuttgart 1904.* — ***Robine et Langlen,*** *L'Industrie des Cyanures. Paris 1903.* — ***Bertelsmann,*** *Die Technologie der Cyanverbindungen. München 1906.*

W. Bertelsmann.

Leuckart
Rudolf.

Geboren am 7. Oktober 1822 in Helmstedt; gestorben am 6. Februar 1898 in Leipzig. Er studierte in Göttingen und ward noch während seiner Studienzeit von Rudolf Wagner mit der Fortsetzung seiner Vorträge über allgemeine Naturgeschichte und mit der Vollendung seines Lehrbuches der Zootomie betraut. 1850 ging er nach Gießen, wo er zunächst außerordentlicher, dann 1855 ordentlicher Professor wurde. Von 1869 an lehrte er dann in Leipzig. Leuckart hat die Wissenschaft durch eine Fülle exakter Arbeiten, namentlich auf dem Gebiete der Zeugungsphysiologie, der Helminthologie, der Systematik und Anatomie der Wirbellosen bereichert. Mit Frey zusammen wies Leuckart das Vorhandensein zweier wesentlich verschiedener Organisationsstufen innerhalb der strahligen Zoophyten nach und gliederte dieselben daraufhin in die beiden Gruppen der Cölenteraten und Echinodermen, nachdem schon vorher von Siebold die Protozoen davon abgetrennt hatte. Er deutete auch zuerst die Organisation der Schwämme richtig und stellte ihre Beziehung zu den Cölenteraten fest. Seine anatomisch-physiologische Analyse führte ihn zur Entdeckung des Polymorphismus, worunter er die durch die Verteilung der Funktionen auf die einzelnen Individuen sich ergebenden Verschiedenheiten verstand, wie sie z. B. bei kolonienweise lebenden Tieren (Siphonophoren) sich finden. Als Kausalmoment spielt auch nach Leuckart das von Milne-Edwards gefundene Prinzip der Arbeitsteilung eine Rolle. Leuckart sah auch im Generationswechsel nur einen durch Arbeitsteilung auf dem Gebiete der Entwickelungsgeschichte bedingten Polymorphismus.

Wichtig sind ferner seine Arbeiten über die Mikropyle der Insekteneier und die Parthenogenesis der Insekten, wodurch er eine Reform der Lehre der Zeugungsvorgänge anbahnte. Klassisch sind seine Schriften über die Blasenwürmer (1856) und die Trichine (1860) geworden, sowie sein zusammenfassendes Werk über die Parasiten des Menschen. Die Lebensgeschichte dieser praktisch wichtigen Parasiten klärte er durch zahlreiche mühevolle und originelle Experimente auf. Er ließ diesem Gebiete die vollkommenste und systematische Darstellung angedeihen, und hob auch seine theoretische Bedeutung hervor. Zu erwähnen ist ferner sein Verdienst als akademischer Lehrer. In seinem Laboratorium sind zahlreiche, auch ausländische Zoologen, nach deutscher Methode geschult worden, wodurch er der herrschenden deutschen Zoologie die größte Anerkennung über den ganzen Erdkreis verschaffte, zu einer Zeit, wo die Zoologie erst begann Gemeingut auch der Völker mit noch junger Kultur zu werden.

Die wichtigsten seiner Werke sind: Beiträge zur Kenntnis wirbelloser Tiere. Mit Frey Braunschweig 1847; Ueber die Morphologie und Verwandtschaftsverhältnisse der wirbellosen Tiere Ebenda 1848; Ueber den Polymorphismus der Individuen oder die Erscheinungen der Arbeitsteilung in der Natur Gießen 1851; Zoologische Untersuchungen Ebenda 1853/54 3 Hefte; Vergleichende Anatomie und Physiologie. Mit Bergmann Stuttgart 1852; Die Fortpflanzung und Entwickelung der Pupiparen Halle 1857; Zur Kenntnis des Generationswechsels und Parthenogenesis bei den Insekten Frankfurt 1858; Untersuchungen über Trichina spiralis Leipzig 1860; Die Blasenbandwürmer und ihre Entwickelung Gießen 1856; Die Parasiten des Menschen und die von ihnen herrührenden Krankheiten Leipzig 1863 bis 1876 2 Bde 2. Aufl. Beendet von Brandes 1879 bis 1901.

Literatur. ***Victor Carus,*** *Zur Erinnerung an Rudolf Leuckart, Ber. üb. d. Verhandl. d. Kgl. Sächs. Ges. d. Wiss. Bd. 50, 1898.* — ***Taschenberg,*** *Rudolf Leuckart. In Leopoldina, Heft XXXV N. 4 1899.*

W. Harms.

Leunis
Johannes.

Geboren zu Mahlerten bei Hildesheim am 2. Juni 1802; gestorben am 30. April 1873 als Professor der Naturgeschichte am Gymnasium zu Hildesheim. Er verdankt seinen über Deutschlands Grenzen hinausgehenden Ruf seinen Lehr- und Schulbüchern. Sein bedeutendstes Werk, zugleich seine Lebensarbeit, ist die bekannte Synopsis der drei Naturreiche. Es erschien 1844 und 1846 und enthielt in seinen Teilen Zoologie, Botanik und Geologie. Das Buch ist vor allem ein Bestimmungsbuch, und als solches sehr wertvoll. Der Zoologie lag das Cuviersche, der Botanik das Decandollesche System zugrunde. Als weitere Schrift Leunis' schloß sich die Synopsis, eine Schul-Naturgeschichte, an, die in den Jahren 1848/49 bis 1853 erschien. Leunis hatte während langen Jahren unermüdlichen Schaffens, Sammelns und Beobachtens ein reiches, wissenschaftliches Material zusammengebracht. Es drängte ihn, dieses Material zu verwerten, was ihn zu einer Erweiterung, einer neuen Auflage der Synopsis veranlaßte. Er konnte aber nur noch zum Teil seine Absicht verwirklichen, an der Vollendung hinderte ihn der Tod. Vollständig von seiner Hand erschien nur der erste Band der Zoologie im Jahre 1860 und vom zweiten Bande Botanik nur die beiden ersten Abteilungen. Das Werk wurde von A. B. Frank in Leipzig und F. Senft in Eisenach vollendet. Gegenwärtig ist die Zoologie in den Händen von Hubert Ludwig in Bonn. Noch heute ist die

L e u n i s sche Synopsis ein Werk, das ein Muster an Klarheit und Uebersichtlichkeit der Darstellung und der Reichhaltigkeit und Korrektheit des Inhaltes.

Literatur. *Nekrolog im Bischöfl. Gymnasium Josephinum. Programm für das Schuljahr 1872/73.*

W. Harms.

Leydig

Franz von.

Geboren am 21. Mai 1821 zu Rothenburg o. d. Tauber; gestorben am 11. April 1908 daselbst. Er studierte in Würzburg, woselbst er sich auch 1849 habilitierte und 1855 zum Extraordinarius ernannt wurde. 1857 folgte er einem Rufe als Ordinarius für Zoologie nach Tübingen, um dann 1875 nach Bonn a. Rh. überzusiedeln, wo er mit L a V a l e t t e St. G e o r g e am Anatomischen Institut wirkte. 1895 trat er in den Ruhestand und lebte zuerst in Würzburg, später bis zu seinem Tode in Rothenburg. Würdigt man die Lebensarbeit L e y d i g s, so ist besonders hervorzuheben, daß er, trotzdem er eine Fülle von Einzeluntersuchungen, die sich über fast alle Tiergruppen erstreckten, geliefert hat, doch sein Arbeitsziel weit über die Kleinarbeit hinaus steckte. Das bezeugt sein leider nicht vollendetes Buch vom Bau des tierischen Körpers. In meisterhafter Form, bewundernswerter Kürze und Unbefangenheit nimmt er hierin zu der großen Frage über die Vorgänge in der belebten Welt Stellung, ohne jemals in eine dogmatische Form zu verfallen. Sein wertvollstes Werk ist und wird auch wohl stets sein Lehrbuch der Histologie des Menschen und der Tiere bleiben. Es ist, was L e y d i g nur bescheiden in der Einleitung des Buches andeutet, die Grundlage und der Ausgangspunkt einer vergleichenden Gewebelehre, deren Begründer und glänzendster Vertreter er war. Das Buch enthält neben anderen wichtigen Errungenschaften die erste noch heute gültige Definition der Zelle. Auf zahlreichen Einzelgebieten hat L e y d i g seine Spur hinterlassen. Bedeutend sind seine Entdeckungen auf dem Gebiet der peripheren Nervenendigungen, man braucht nur an die Organe des sechsten Sinnes und die peripheren Nervenzellen zu erinnern. Es ist nichts Ungewöhnliches, in der Anatomie und Histologie L e y d i g s Namen als Entdecker dieses oder jenes Organes zu finden, es gibt keine Tierklasse, von den Einzellern bis zu den Säugetieren, deren Kenntnis er nicht bereichert hat. L e y d i g war ein Mann von großer Feinfühligkeit, Lauterkeit und Festigkeit des Charakters; ein Gelehrter und Künstler zugleich, wovon seine oft prachtvoll illustrierten Arbeiten zeugen, die nunmehr folgen mögen. Von seinen Arbeiten seien genannt: Beiträge zur mikroskopischen Anatomie und Entwickelungsgeschichte der Rochen und Haie Leipzig 1852; Anatomisch-histologische Untersuchungen über Fische und Reptilien Berlin 1853; Lehrbuch der Histologie des Menschen und der Tiere Frankfurt 1857; Naturgeschichte der Daphniden Tübingen 1860; Das Auge der Gliedertiere Ebenda 1864; Vom Bau des tierischen Körpers Handbuch der vergleichenden Anatomie Ebenda 1864 Nur Bd. I unvollendet; Tafeln zur vergleichenden Anatomie Ebenda 1864 Heft 1; Der Eierstock und die Samentaschen der Insekten Dresden 1866; Ueber die Molche der württembergischen Fauna Berlin 1868; Die in Deutschland lebenden Arten der Saurier Tübingen 1872; Ueber die allgemeinen Bedeckungen der Amphibien Bonn 1876; Die Hautdecke und Schale der Gastropoden, nebst einer Uebersicht der heimischen Limacinen Berlin 1876; Die anuren Batrachier der deutschen Fauna Bonn 1877; Die augenähnlichen Organe der Fische Ebenda 1881; Untersuchungen zur Anatomie und Histologie der Tiere Ebenda 1881; Zelle und Gewebe Ebenda 1885; Das Parietalorgan der Amphibien und Reptilien Frankfurt 1890; Zur Kenntnis der Zirbel und Parietalorgane Ebenda 1896; Horae zoologicae Zur vaterländischen Naturkunde Jena 1902.

Literatur. ***M. Nussbaum,*** *Franz von Leydig. Sitzungsber. d. Niederrhein. Ges. f. Natur- u. Heilk., Bonn 1908, u. Anat. Anz., 32. Bd., 1908. —* ***O. Schulze,*** *Münch. med. Wochenschr. Nr. 18 1908. —* ***O. Taschenberg,*** *Leopoldina, 1909 S. 37.*

W. Harms.

Lianen.

1. Allgemeines. Einteilung 2. Spreizklimmer 3. Rankenpflanzen 4. Windepflanzen 5. Wurzelkletterer 6. Anatomie der Lianenstämme

1. Allgemeines. Einteilung. L i a n e n, Kletterpflanzen, sind im Boden wurzelnde Kräuter oder Holzgewächse, deren langgliedrige biegsame Stengel nicht vermöge eigener Biegungsfestigkeit imstande sind, sich aufrecht zu halten, und ihr Laubwerk und ihre Blüten in die zum Licht günstigste Lage zu bringen; vielmehr bedürfen sie anderer Gewächse als Stützen, auf denen ihre Zweige ruhen oder an denen sie sich mittels besonderer Einrichtungen befestigen.

Das Hauptentwickelungsgebiet der Lianen ist der immergrüne tropische Regenwald mit seiner Ueberfülle mannigfaltigster Vegetationstypen. Hier winden und klettern ihre Langtriebe an Bäumen oder im Gesträuch aus dem Waldesschatten empor in die Laubkronen, wo sie ihr Laubwerk entfalten und sich in den Raum mit zahlreichen Epiphyten teilen. Der Kampf der Waldpflanzen um das Licht hat die Entwickelung dieser Pflanzengenossenschaften gefördert. Besonders reich ist der tropische Wald an holzigen Lianen; Hunderte von Arten aus den verschiedensten Familien gehören zu ihnen. An den tropischen Wald schließen sich als selbständige Entwickelungsherde von Lianen die temperierten Regenwälder an, besonders der südchilenische und der neuseeländische, beide mit eigenartigen

Typen, während die Hartlaubgehölze der wärmeren und die Sommer- und Nadelwälder der kühleren temperierten Zonen weniger reich oder arm an holzigen Vertretern der Kletterpflanzen sind. Waldrebe, Geisblatt und Epheu sind die einzigen Holzlianen unserer einheimischen Wälder, während die Kletterkräuter in unseren Hecken und Staudenfluren in größerer Artenzahl erscheinen. Je offener und niedriger die Pflanzendecke eines Geländes ist, desto mehr treten die Lianen zurück und verschwinden schließlich ganz in alpinen Höhen, in der Arktis, Antarktis und in den Wüsten.

Nach der Art der Befestigung der kletternden Langtriebe unterscheiden wir die vier ökologischen Gruppen der Spreizklimmer, der Ranker, der Winder und der Wurzelkletterer. Im allgemeinen herrscht unter den Lianen eines engeren Verwandtschaftskreises, oft sogar auch einer ganzen Familie, ein einziger solcher Klettermodus vor. So enthalten die Convolvulaceen, Menispermaceen und Aristolochiaceen Winder, die Araceen Wurzelkletterer, die Vitaceen, Cucurbitaceen und Sapindaceen Ranker. Unterschiede in der spezifischen Organisation mögen dies bedingen und andererseits auch bewirken, daß in gewissen Familien überhaupt keine Lianen zum Vorschein gekommen sind. Es gibt aber auch Familien, in denen mehrere Klettervorrichtungen sich herausgebildet haben; so enthalten die Papilionaceen Winder, Zweigranker und Blattfadenranker.

Die Klettervorrichtungen stellen sich an den jungen Pflanzen erst von einem gewissen Altersstadium, bald früher, bald später, je nach den Arten, ein. Erst wenn die Pflanze etwas erstarkt ist, beginnt der Hauptstengel ein ausgiebiges und rasches Längenwachstum, um mit möglichst geringem Aufwand an Baustoffen zu Licht und Luft emporzusteigen. Die Langtriebe zeigen allgemein ein Vorauseilen der Internodiumstreckung vor der Blattentfaltung; die mit kleinen Blattanlagen besetzten langen geißelartigen Enden der Langtriebe können so unbehindert an den Stützpflanzen emporwachsen.

Bei den meisten Lianen ist ein oft scharf ausgeprägter Dimorphismus der Sprosse, langgliedrige Klettersprosse und kürzere beblätterte Seitensprosse vorhanden.

2. Spreizklimmer (Fig. 1). Als Spreizklimmer bezeichnen wir alle Lianen, die weder winden, noch ranken, noch mittels Haftwurzeln an Baumstämmen oder Felswänden sich befestigen. Vielmehr ruhen die spreizklimmenden Gewächse mit ihren Sprossen oder Blättern, vielfach auch mittels rückwärts gekrümmter Stacheln oder Dornen angehakt auf ihren Stützpflanzen, ohne an ihnen befestigt zu sein. Die hierher gehörigen Formen zeigen weitgehende habituelle Unterschiede. Manche stehen noch auf einer Anfangsstufe des Kletterns, während andererseits die Rotangpalmen sehr vollkommene und hochemporwachsende Waldlianen vorstellen.

Spreizklimmer sind in der europäischen Flora nur sparsam vertreten. Als Beispiele seien Cucubalus baccifer, Galium aparine, Rubia tinctorum erwähnt, alle drei krautig, die bei den letzteren mit rückwärtsgerichteten Stachelhaaren besetzt. Ihre Langtriebe werden dadurch aufrecht gehalten, daß die abspreizenden Seitenzweige sich auf das Geäst der Stützpflanzen legen. Ein vortrefflicher Spreizklimmer ist das im tropischen Asien heimische krautige Polygonum perfoliatum, das an seinen Blattstielen und den Blattnerven der Blattunterseite mit zahlreichen rückwärts gerichteten scharfen Stachelchen besetzt ist. Hochgehende holzige Kettersträucher mit spreizenden Zweigen, vielfach auch mit Dornen und Stacheln versehen, treten in den tropischen Wäldern häufig auf, in Brasilien z. B. Fuchsia integrifolia, Lantana lilacina, Bougainvillea spectabilis, Peireskia aculeata, Mimosa Velloziana. Sogar die Gramineen und Cyperaceen stellen hierher gehörige Kletterpflanzen, erstere in einigen Bambuseen, letztere in der brasilianischen Scleria reflexa, die mit ihren stachelhaarigen Blättern sich festhält und die Waldbäume mit Grasdickichten überzieht.



Fig. 1. Calamus adspersus. Blatt mit Flagellum. Stark verkleinert.

Die kletternden Palmen zeigen verschiedenes Verhalten. Ihre bis fingerdicken, unverzweigten, sehr zähen und langgliedrigen Stämme können bei einzelnen Arten enorme Länge erreichen; Treub beobachtete auf Java eine Palmliane von 240 m Länge. Die vollkommensten Vertreter sind die Rotangpalmen des tropischen Asiens, die hauptsächlich zu Calamus gehören. Ihre Hakenapparate sind sehr lange, mit Stacheln besetzte, sich leicht an Stützen anhakende Flagellen, die entweder aus den stark verlängerten Blattspindeln der Fiederblätter (Fig. 1) oder aus Infloreszenzachsen mit unterdrückten Blüten hervorgegangen sind. Im amerikanischen Tropenwald werden die Rotangs durch die Gattung Desmoncus ersetzt, deren Fiederblätter in eine

lange Harpune mit rückwärts gerichteten Dornpaaren, den metamorphosierten obersten Fiederpaaren, verlängert erscheinen. Die in Neu-Granada heimische viele Meter lange Chamaedorea desmoncoides endlich besitzt keine Hakenorgane, sondern nur schräg nach unten gerichtete Blattfiedern, die sich im Geäst der Stützbäume verankern.

3. Rankenpflanzen. Die Rankenpflanzen unterscheiden sich von allen übrigen Lianen durch thigmotropische (haptotropische) Reizbarkeit ihrer Kletterorgane. Thigmotropismus kommt nur den Rankenorganen zu, solange sie sich noch im jungen streckungsfähigen Stadium befinden. Nach der Befestigung der Ranke vollziehen sich in ihr als weitere Folge des mechanischen Reizes auch noch vorteilhafte anatomische Differenzierungen, vor allem Verdickung und Verholzung ihrer befestigten Teile, während solche an den nicht zur Funktion gelangten Ranken unterbleiben.

Das Auffinden der Stützen wird begünstigt durch autonome Nutationsbewegungen entweder der Ranken oder der sie tragenden Langsprosse oder in den meisten Fällen von beiden. Vorteilhaft ist ferner die bei Rankern allgemein verbreitete Eigentümlichkeit, ihre Greiforgane an den Enden der Sprosse frühzeitig vor der Blattentfaltung zu entwickeln, wodurch das ungehinderte Erfassen von Stützen ermöglicht wird.

Die Rankenpflanzen gehören teils zu den Monocotylen, teils zu den Dicotylen und zeigen je nach ihrer Herkunft sehr verschiedene Ausbildung ihrer Kletterorgane. Nach dem morphologischen Charakter der Ranken unterscheiden wir die beiden Gruppen Blattranker und Sproßranker. Sie enthalten teils weniger gut, teils besser ausgerüstete Vertreter.

An den Ranken verschiedener Gattungen sind von Haberlandt bestimmte Strukturen, Fühltüpfel oder Fühlpapillen, nachgewiesen, die der Aufnahme des Kontaktreizes dienen sollen.

A. Blattranker. Wir unterscheiden unter ihnen eine ökologisch und morphologisch niedere und eine höhere Stufe; bei ersterer sind die Laubblätter nicht oder nur wenig verändert, besitzen flache Spreiten und sind nun entweder an den Blattstielen, oder an den verlängerten Blattspitzen, im einfachsten Falle sogar an den Spreiten selbst, mit Reizbarkeit ausgestattet.

a) Blattspreitenranker sind nur aus der Familie der Fumariaceen bekannt. Fumaria officinalis, ein Ackerunkraut, verdient besondere Erwähnung, da sie außer in ihrer gewöhnlichen, nicht rankenden Form auch in sehr ästigen, bis 50 cm, sogar bis 1 m hohen Varietäten, die in Hecken emporranken, auftritt. Zwischen rankenden und nicht rankenden Blättern ist kein Unterschied zu bemerken; alle sind dreifach gefiedert mit fiederspaltigen Fiederchen, die ebenso wie die Fiederstielchen um Stützen, Grashalme z. B., noch ziemlich unvollkommene Krümmungen ausführen und so die Pflanze locker befestigen. Fumaria capreolata ist bereits ein Blattstielranker und in noch höherem Maße ist dies die zur gleichen Familie gehörige hochkletternde Adlumia cirrhosa, bei der die Fiederstielchen sehr lang und leicht reizbar sind, die obersten schmäleren Blattfiedern aber auch noch Krümmungen ausführen, während bei Corydalis claviculata die oberen Blätter bereits in ihren letzten Auszweigungen typische Fadenranken ohne Spreiten ausbilden.

b) Blattstielranker (Fig. 2) sind uns aus mehreren Familien bekannt. Die Ranunculaceen liefern sie aus der Gattung Clematis, deren Arten meist als holzige Lianen hoch emporklettern. Die Haupt- und Fiederstiele der entweder ungeteilten oder dreiteiligen oder gefiederten Blätter sind reizbar und führen Krümmungen um Stützen aus, solange sie noch jung, und ihre Spreiten noch nicht entwickelt sind. Typische Blattstielranker entstammen ferner den Tropaeolaceen (Arten von Tropaeolum), den Scrophulariaceen (mexikanische Arten von Maurandia, Lophospermum Fig. 2, Rhodochiton), den Solanaceen (einige Arten von Solanum), den Mimosaceen (Entada), den Loasaceen (Fuertesia domingensis auf S. Domingo).



Fig. 2. Lophospermum scandens. Blattstielranker. Nach Noll.

c) Von Blattspitzenrankern gibt es nur wenige Vertreter, die fast sämtlich zu den Monocotylen gehören. Ihre sitzenden lanzettlichen Blätter verjüngen sich nach der Spitze zu und laufen in eine kürzere oder längere, sich um Stützen spiralig einrollende Endranke aus. Die vollkommenste Liane dieses Typus ist Flagellaria indica, deren Ranken an ihrer morphologischen Oberseite reizbar sind. Bei den Blattspitzenrankern aus der Familie der Liliaceen (Gloriosa, Littonia, einige nur niedrig bleibende Fritillaria-Arten, Polygonatum kingianum) ist die morphologische Unterseite der eingerollten Endranke reizbar. Zu den Dicotylen gehört die australische Stylidiacee Stylidium scandens, deren Blätter sämtlich in Wirteln stehen, die untersten kürzer und ohne Ranken, die oberen sämtlich an ihrer Spitze mit spiraligen Hakenranken, die übrigens in bezug auf Kontaktreizbarkeit noch der Untersuchung bedürfen.

d) Blattfadenranker (Fig. 3 und 4) sind in sehr zahlreichen Arten vertreten, die sich auf 9 Familien verteilen. Unter ihnen nehmen die monocotylen Smilax-Arten eine isolierte Stellung ein. Bei ihnen entspringen die anfangs geraden, bald aber etwas spiralig einge-

rollten Ranken paarweise, als eigenartige fadenförmige Auswüchse über dem scheidenartig verbreiterten Blattgrund.

Die dikotylen Blattfadenranker verhalten sich sämtlich mit Ausnahme der Cucurbitaceen insofern übereinstimmend, als bei ihnen die Blätter gefiedert sind und im unteren Teile normale assimilierende Blattfiedern tragen, während ihre Endfieder und meist auch die oberen Seiten-

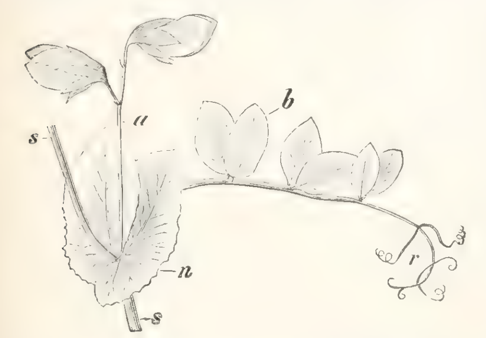


Fig. 3. Pisum sativum. Blattfadenranker. s Stengel, n Nebenblätter. ½.

fiedern Umbildung zu fadenförmigen Wickelranken erfahren haben. Der assimilierende und der rankende Teil des Blattes sind scharf voneinander abgesetzt. Hierher gehören als typische Vertreter die Vicieen (Ervum, Vicia, Pisum Fig. 3, Lathyrus). Ihre Ranken entsprechen den ganzen Blattfiedern. Bei Lathyrus aphaca unterbleibt die Bildung von Blattfiedern; am Grunde der einfachen Ranke stehen nur die beiden hier sehr großen Nebenblätter. Unter den Vicieen sind Uebergänge zwischen niedrigen nicht ran-



Fig. 4. Bignonia catharinensis. Krallenranken. 4/9.

kenden Formen und solchen mit deutlichen Ranken vorhanden.

Die südamerikanische Kompositengattung Mutisia enthält eine Anzahl dünnstengeliger kletternder Halbsträucher, die in ihren Rankenformen im wesentlichen Uebereinstimmung mit den Vicieen aufweisen.

Unter den Mimosaceen stellt die Gattung Entada einige hochkletternde Arten mit Blattranken. Bei Entada scandens tragen die im unteren Teile doppelt gefiederten Blätter an ihren Enden je ein Paar einfacher Ranken, die morphologisch den Stielen von Blattfiedern mit unterdrückten Spreiten entsprechen. Es gibt auch blattstielrankende Entada-Arten. Eine interessante Uebergangsform ist nach Czapek Entada polystachya, deren doppeltgefiederte Blätter 3 Fiederpaare mit reizbaren walzenförmigen Fiederstielen aufweisen. Das oberste Paar bildet am jungen Blatt eine Art Gabelranke, deren endständige Spreitenanlagen unentwickelt bleiben, wenn sich die Rankenäste an einer Stütze befestigt und verdickt, dagegen die Fiederblättchen entfalten, wenn sie keine Stützen gefunden haben.

Auch innerhalb der sonst nur blattstielrankenden Gattung Clematis gibt es einige Arten, bei denen die obersten Blattfiedern ihre Spreite nicht mehr ausbilden, während ihre Stiele als Fadenranken fungieren.

Sehr reichverzweigte und hochentwickelte Ranken besitzt die amerikanische Polemoniacee Cobaea; die letzten Auszweigungen der Ranke sind kurz und tragen an ihren Spitzen je ein Paar Widerhäkchen, die den Spreiten entsprechen, während die Rankenarme verlängerte Fiederstielchen vorstellen. An den Primärblättern steht an Stelle der ganzen vielteiligen Ranke nur ein einfaches breites Endblättchen.

Auch bei den zahlreichen Bignoniaceen dürften die Ranken metamorphosierte Fiederstielchen vorstellen. Entweder sind sie hier einfache Endranken oder 3 gabelig, bei Eccremocarpus scaber und Tourretia lappacea aber reich verzweigt und ähnlich wie bei Cobaea beschaffen. Bei einigen Bignonieen entwickeln sich an den Enden der Ranken und ihrer Aeste infolge des Kontaktreizes runde flache Haftscheiben, mittels deren sie sich an Baumstämmen in wirksamster Weise befestigen können. Eine besondere Form der Bignonieenranke erscheint bei Bignonia unguis und einigen anderen Arten. Die dreiteilige Endranke des mit einem Fiederpaare versehenen Blattes hat die Gestalt von drei scharfen kurzen Vogelkrallen, die an den Unebenheiten des Substrates, Baumrinde oder Felsen, sich anhaken (Fig. 4).

Nur bei den Cucurbitaceen sind die Blätter scharf geschieden in assimilierende spreitentragende und fadenförmige rankende. Ihre Ranken sind entweder einfach und entsprechen dann metamorphosierten Vorblättern von Achselsprossen oder sie sind verzweigt (z. B. bei Cucurbita), und besitzen einen Stiel und einige von dessen Gipfel spiralig entspringende Fadenranken. Nach Goebel ist der Rankenstiel ein Axillarsproß der einfachen Ranke, die an ihm hinaufgewachsen ist, während die Rankenarme metamorphosierte Blätter vorstellen und in ihren Achseln sogar zuweilen Blüten tragen können. Gelegentlich beobachtet man Mittelbildungen zwischen Ranken und Blättern, aus denen hervorgeht, daß letztere der Mittelrippe der Spreite, nicht etwa dem Blattstiel entsprechen. Bei einigen Cucurbitaceen entwickeln sich Haftscheiben an den Enden der Ranken. Die Cucurbitaceen sind die vollkommensten Blattranker und zeigen in besonders typischer Weise die übrigens auch bei vielen anderen Fadenranken, auch bei denen von Sproßcharakter, zu beobachtende Erscheinung, daß von der Umwickelungsstelle abwärts die Ranke sich nachträglich schraubig einrollt, wobei mit mechanischer Notwendigkeit Wendepunkte sich einstellen, unterhalb deren die Schraubenlinie in entgegengesetzter Richtung weiterläuft. Diese schraubige Einrollung bewirkt

eine vorteilhafte Federung zwischen Stütze und Langtrieb.

B. Sproßranker. Die Lianen mit Rankenorganen von Sproßcharakter lassen sich in die Gruppen der Zweigranker, Hakenranker, Uhrfederranker und Fadenranker einordnen.

a) Zweigranker oder Zweigklimmer (Fig. 5 und 6). Wie unter den Blattrankern die phylogenetisch primitiven Formen rankende Blätter aufweisen, die morphologisch nicht oder nur wenig abgeändert sind, so besitzen die Zweigranker Seitensprosse, die noch normal beblättert sind, aber mit Reizbarkeit gegen feste Stützen ausgestattet sind und sich bald hier bald dort, wo sie mit solchen in Berührung kommen, befestigen.



Fig. 5. Securidaca Sellowiana. Zweigranker. Brasilien. $^4/_9$.

Die typischen Zweigklimmer sind sämtlich tropische, überwiegend amerikanische Lianen mit holzigen Stämmen. Die Langtriebe ranken nicht, wohl aber ihre Seitenäste und meist auch deren weitere Auszweigungen, solange diese noch jung und streckungsfähig sind und ihre Blätter noch nicht ganz entfaltet haben. So entstehen oft wunderliche Rankengewirre (Fig. 5). Die gerankten Teile erfahren dann ein stärkeres sekundäres Dickenwachstum, bleiben mehrere Jahre, nachdem die Blätter schon abgefallen sind, manchmal sogar als einige Zentimeter dicke holzige Klammern erhalten, bis sie schließlich absterben und abfallen (Fig. 6). Hierher gehören Polygalaceen (Securidaca Fig. 5, Bredemeyera), Hippocrateaceen (Hippocratea, Salacia), Connaraceen (Agelaea, Rourea), Papilionaceen (Dalbergia Fig. 6, Ecastaphyllum, Machaerium), Mimosaceen (Acacia,) Anonaceen (Uvaria), Thymelaeaceen (Linostoma).

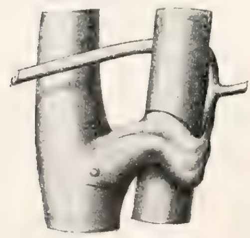


Fig. 6. Dalbergia variabilis. Aeltere verholzte Zweigranke. $^2/_9$.

Besonderes Interesse bieten die Machaerien, die an ihren meist einfachen rankenden Seitenzweigen Doppelhäkchen von Stipularcharakter aufweisen. An den Ranken einiger Machaerien und auch den mit zahlreichen Hakenstacheln besetzten Zweigranken der kletternden Akazien unterbleibt die Bildung von Fiederblättern, so daß hier lange blattlose, ausschließlich der Befestigung dienende Organe vorliegen, die aber morphologisch durch ihren Aufbau aus zahlreichen Internodien, durch ihre Dornen oder Stacheln sowie durch holzige Struktur sich von den krautigen Fadenranken der Passifloren und Vitaceen unterscheiden.

b) Hakenranker (Fig. 7). Eine Anzahl tropischer, hauptsächlich asiatischer Klettersträucher besitzt haken- oder krallenförmige Kletterorgane. Diese sind blattlose Seitenäste, an ihrer Innenseite mit Reizbarkeit ausgestattet, sie krümmen sich, falls eine Stütze sich in ihnen gefangen hat, um diese fest ein, wachsen dann kräftig in die Dicke und werden so zu mehrjährigen holzigen Klammern. Die Haken sind bei den Rutaceen Luvunga und Paramignya und vielleicht auch bei der Olacacee Olax scandens aus Dornen, die in beiden Familien häufig auftreten, hervorgegangen. Bei den meisten Hakenrankern dagegen dürften die Kletterhaken reizbar gewordene Infloreszenzstiele vorstellen, die in gewissen Fällen auch noch Blüten tragen können, meist aber ausschließlich als Klammerorgane dienen. Hierher gehören Artabotrys (Anonaceae), Hugonia (Linaceae), Ancistrocladus (Dipterocarpaceae), Strychnos (Fig. 7 Loganiaceae), Ouroupari (Rubiaceae). Unter ihnen sind die elastischen Spiralhaken von Strychnos (Fig. 7) wohl die vollkommensten. Ihr Sproßcharakter ist noch daran zu erkennen, daß sie im jungen Stadium, wenn sie noch gerade gestreckt sind, dicht unter der Spitze ein rudimentäres Blattpaar tragen.



Fig. 7. Strychnos triplinervia. Hakenranker, Brasilien, links verdickter Haken. $^4/_9$.

c) Uhrfederranker (Fig. 8). Sie schließen sich am nächsten an die Hakenranker an. Ihre Kletterorgane sind blattlose, dünne, spiralig in einer Ebene locker eingerollte, elastische, nur auf der Unterseite reizbare Ranken, in denen die Stützen sich bei Bewegung der Pflanzen durch den Wind einfangen. Infolge des Kontaktreizes krümmt sich die Spirale um die Stütze ein und erfährt nun an dem befestigten Teile eine stärkere Verdickung allerdings nicht in dem Maße, wie bei den Haken. Morphologisch entsprechen die Uhrfederranken wohl sämtlich metamorphosierten Blütenstandsachsen. Hierher gehören ausschließlich tropische Kletterpflanzen, die Rhamnaceen Gouania, Ventilago, Helinus, die Caesalpinacee Bauhinia, zahlreiche Sapinda-

ceen aus den Gattungen Urvillea, Cardiospermum, Thinouia, Serjania (Fig. 8), Paullinia und endlich die Olacacee Combretopsis.

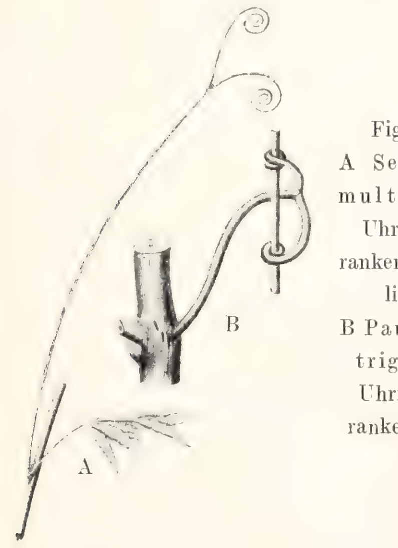


Fig. 8. A Serjania multiflora. Uhrfederranker, Brasilien. B Paullinia trigonia. Uhrfederranker. 4/9.

d) Sproßfadenranker (Fig. 9). In vollkommenster Art sind die Fadenranken von Sproßcharakter bei den Passifloraceen und Vitaceen ausgebildet, bei ersteren blattlos und unverzweigt, bei letzteren dagegen sympodial verzweigt und an jeder Gabelstelle mit einem winzigen Schuppenblatt versehen, aus dessen Achsel ein Rankenast höherer Ordnung hervorgeht. Anfangs sind diese Ranken gerade, später an der Spitze etwas eingekrümmt. Morphologisch sind sie bei allen Vertretern als metamorphosierte Infloreszenzachsen zu betrachten. In der Tat beobachtet man bei Vitis vinifera häufig Uebergangsformen zwischen Rispen und Ranken. Vitis serjaniaefolia aus China zeigt noch keine Differenzierung in Ranken und Rispen, vielmehr ist hier der verlängerte Hauptstiel einer jeden Rispe zum Ranken befähigt.



Fig. 9. Parthenocissus Veitchii. Haftscheibenranker. Nach Noll. 3/4.

Fadenranker finden wir ferner bei Polygonaceen (Antigonum, Brunnichia), Dioscoreaceen (Petermannia cirrhosa), Olacaceae (Erythropalum), Icacinaceen (Iodes, Polyporandra), Apocynaceen (Willughbeia, Landolphia, Carpodinus).

Gewisse Vitaceen (Ampelopsis) mit mehrfach gegabelten kurzen Ranken entwickeln an den Enden der Rankenäste kleine Ballen, die bei Berührung mit einer Stütze infolge des Kontaktreizes zu runden flachen Haftscheiben heranwachsen (Fig. 9). Oekologisch verhalten sich solche Haftscheibenranker, denen wir bereits unter den Blattfadenranken bei den Bignonieen begegneten, wie die Wurzelkletterer.

4. Windepflanzen (Fig. 10). Die Winder übertreffen an Zahl der Arten und Gattungen bei weitem die drei übrigen Gruppen der Lianen. Innerhalb der verschiedensten Familien hat sich die Fähigkeit zu winden, eingestellt, bald nur bei einzelnen Vertretern, bald bei der Mehrzahl der Gattungen. Familien, in denen die Winder vorherrschen, sind die Dioscoreaceen, Menispermaceen, Malpighiaceen, Aristolochiaceen, Phaseoleen, Asclepiadaceen, Convolvulaceen. Bei den windenden Farnkräutern Lygodium und Blechnum volubile winden die viele Meter langen Wedelspindeln, bei allen übrigen Vertretern die Langtriebe. Die Windepflanzen bedürfen senkrechter oder nahezu senkrechter Stützen, die von ihnen schraubenlinig umwachsen werden. Das Ende des windenden Stengels krümmt sich aktiv in wagerechte Lage und beschreibt nun bei fortschreitendem Längenwachstum eine kreisende Bewegung um die Stütze. Die obersten Windungen steigen in flacher Schraubenlinie um die Stütze auf, weiter abwärts werden die Windungen infolge des negativen Geotropismus des Stengels steiler, bis sie der Stütze fest anliegen. An den Keimpflanzen bleiben die untersten Internodien noch gerade und das Winden stellt sich erst von einer gewissen Höhe, je nach den Arten verschieden, ein. Die Stengel winden entweder links (Fig. 10), so die meisten Winder, Aristolochia, Phaseolus, Convolvulus, Pharbitis, oder rechts (Humulus, Polygonum, Lonicera); seltener wechselt die Richtung (Loasa, Mühlenbeckia).

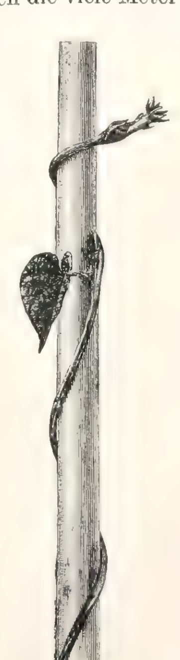


Fig. 10. Pharbitis hispida (Convolvulacee). Links windend. Nach Noll.

Bei gewissen Windepflanzen wird das Festhalten der Langtriebe an den Stützen

außer durch die Windungen selbst auch noch durch rückwärts gerichtete Stachelhaare begünstigt, wofür der Hopfen ein bekanntes Beispiel liefert.

5. **Wurzelkletterer.** Die Wurzelkletterer befestigen ihre an Baumstämmen oder Felswänden emporkriechenden Langtriebe mittels Adventivwurzeln, die je nach den Arten einfach oder verzweigt, kürzer oder länger sind und nur an den Knoten oder auch an den Internodien entspringen und die in der Regel nicht mehr der Nährstoff- und Wasseraufnahme dienen. Wir besitzen in der Araliacee Hedera helix, dem Efeu, einen typischen Vertreter dieser Gruppe. Seine kurzen einfachen Haftwürzelchen entspringen der beschatteten, dem Substrat zugewendeten Seite der Klettersprosse. Wachsen die Sprosse am Boden oder an feuchten Felswänden, so entwickeln sich die Adventivwurzeln zu reich verzweigten Nährwurzeln. Die Klettersprosse tragen fünflappige Blätter, die in mosaikartiger Anordnung dem Substrat anliegen. Erreichen die plagiotropen Langtriebe die oberen, direkt belichteten Stellen der Felswände oder Stützbäume, so verzweigen sie sich buschig in orthotrope Aeste, die abgerundet rhombische, zugespitzte Blätter tragen und zur Blütenbildung übergehen. Man darf diese Blattform als die phylogenetisch ältere der Gattung Hedera, die Blattform der Klettersprosse hingegen als die abgeleitete und für die kletternde Lebensweise ökologisch vorteilhaftere betrachten. Ein ähnlicher Dimorphismus des Laubes wiederholt sich auch bei manchen anderen Wurzelkletterern.

Den Windern und Rankern gegenüber steht die Gruppe der Wurzelkletterer an Artenzahl bedeutend zurück. Am häufigsten erscheinen sie in tropischen Wäldern (Arten von Piper, Ficus, Conocephalus, Marcgraavia, Begonia, Vanilla, Lomariopsis, Polybotrya usw.). In Nordamerika sind Rhus toxicodendron und Tecoma radicans zu nennen, in Japan Evonymus radicans, im Himalaya Hydrangea altissima, in Neuseeland Metrosideros scandens und verwandte Arten.

Auch unter den Epiphyten gibt es wurzelkletternde langstengelige Gewächse. Unter den zahlreichen epiphytischen Araceen tropischer Wälder beginnen manche ihre Entwickelung als Wurzelkletterer, wachsen dann in die Baumkronen hinauf und werden dadurch zu Epiphyten, daß ihre unteren Stammteile nach und nach absterben. Die Araceen erzeugen zweierlei Wurzeln, Haftwurzeln mit unterdrückter Gefäßbildung und nur der Befestigung dienend und lange zum Boden senkrecht herabwachsende Nährwurzeln mit weiten Gefäßen.

6. **Anatomie der Lianenstämme.** Die Stämme der Lianen, besonders die sekundär verdickten der holzigen Arten zeigen in ihrem anatomischen Bau einige gemeinsame, ökologisch vorteilhafte Eigentümlichkeiten. Zunächst ist die auffallende Weite der Gefäße im sekundären Holz hervorzuheben, die die durchschnittliche Gefäßweite von Baumhölzern bedeutend übertrifft. Neben engen Gefäßen und Tracheiden werden bei fast allen holzigen Lianen weitlumige Tüpfelgefäße vom Cambium gebildet, deren Durchmesser meist 0,2 bis 0,4 mm, bei einzelnen Arten sogar 0,6 bis 0,7 mm beträgt. Im Vergleich mit normalwüchsigen Pflanzen besitzen die Lianen einen verhältnismäßig geringen Stammdurchmesser. Viele holzige Lianenstämme des tropischen Waldes weisen nur etwa Fingerdicke, manche nur Armdicke auf und nur selten begegnet man uralten mächtigen Exemplaren, deren Hauptstamm etwa $^1/_3$ m Durchmesser erreicht. Der verhältnismäßig dünne Lianenstamm hat nun über eine sehr lange Strecke hin beträchtliche Wassermengen zu leiten. Der für die Wasserbahnen zur Verfügung stehende Raum im Holz wird durch die Ausbildung möglichst weiter Röhren am besten ausgenutzt. Die engen Gefäße und Tracheiden, die in erster Linie das Emporsteigen des Wassers vermitteln, schöpfen ihren Bedarf aus diesen großen Wasserreservoiren, die einen gleichmäßigen Verlauf der Transspiration herbeiführen. Feuchtes regenreiches Klima, wie es im tropischen Regenwald herrscht, bietet naturgemäß solchen Stämmen die besten Lebensbedingungen und daher haben sich dort auch die Holzlianen in größter Fülle herausgebildet.

In den meisten Lianenstämmen erzeugt das Cambium zuerst einen schmalen festen Holzring aus englumigen Elementen, das axiale Holz, an das nunmehr das lockerer gebaute, mit weiten Gefäßen versehene und gewöhnlich parenchymreiche periaxiale Holz angelagert wird. Die scharfe Abgrenzung beider Holzarten steht im Einklang mit dem Verhalten der kletternden Langtriebe, welche anfangs rasch in die Höhe wachsen und noch wenig transpirierende Blattflächen aufweisen, also der mechanischen Festigung eher bedürfen als ausgiebiger Wasserbahnen, die erst mit der Entwickelung des Laubwerks an den Seitenzweigen erforderlich werden. Das periaxiale Holz kann als das typische Lianenholz bezeichnet werden.

Viele holzige Lianen zeigen eine mehr oder weniger ausgeprägte Kabelstruktur ihrer sekundär verdickten Stämme. Abweichende Formen des Dickenwachstums treten auch bei Bäumen und Sträuchern als besondere Eigentümlichkeit gewisser systematischer Sippen auf, bei den Lianen aber häufen sie sich in besonders hohem Maße.

Der ökologische Vorteil, den die Kabelstruktur bietet, läßt sich aus der mechanischen Inanspruchnahme der Lianenstämme ermessen. Im tropischen Wald erscheinen die älteren Lianenstämme als nackte, von den Baumkronen frei durch die Luft zum Boden herabhängende Taue. Die rankenden Arten sind in ihrer Jugend mit Kletterorganen im Geäst von Stützpflanzen befestigt, später aber brechen die Ranken ab. Die Windepflanzen benutzen mit Vorliebe dünne Baumstämmchen oder die Luftwurzeln von Aroideen oder auch die Stengel anderer Kletterpflanzen, die sie dann erdrücken. So werden die älteren holzigen Stämme frei, rutschen öfters auch hinunter und legen sich mit ihren unteren Teilen in Windungen auf den Boden. Die Spreizklimmer verhalten sich meist in ähnlicher Weise, während hingegen die Wurzelkletterer stets mit ihren Langtrieben an Baumstämmen oder Felswänden befestigt bleiben und dementsprechend im allgemeinen auch keine besonderen Abweichungen in ihrem Dickenwachstum aufweisen.

Die herabhängenden Lianentaue brauchen nicht besonders biegungsfest konstruiert zu sein, wie die aufrechten Baumstämme, vielmehr werden sie in erster Linie auf Zugfestigkeit, Biegsamkeit und Torsionsfähigkeit mechanisch in Anspruch genommen. Hierfür gilt die Kabelstruktur als vorteilhafteste Konstruktion, die Auflösung des festen geschlossenen zylindrischen Holzkörpers in eine Anzahl gesonderter Holzstränge oder Holzplatten, die verschiebbar in weiches und lebenstätiges Rindengewebe eingebettet sind.

Wie unter den Klettervorrichtungen sind auch unter den anomalen Stammstrukturen vollkommenere und unvollkommene zu unterscheiden.

Entwickelungsgeschichtlich kommen die Kabelstrukturen auf verschiedene Weise zustande. Im folgenden seien nur die wichtigsten und häufigsten Typen abweichenden Dickenwachstums herausgegriffen.

Fig. 11. Aristolochia triangularis. $^{7}/_{4}$.

1. Aristolochia-Typus (Fig. 11). Der Cambiumring lagert an die primären Gefäßbündel sekundäres Holz mit breiten sekundären Markstrahlen an und an die sehr breiten primären Markstrahlen nur sekundäres Markstrahlengewebe. So bleiben im verdickten Stamm die Holzplatten durch weiches Gewebe getrennt und sind bei Torsion und Biegung des Stammes leicht verschiebbar. Außer für Aristolochia ist dieser Typus auch für Clematis, Vitis, Cissus, Cucurbitaceen, Mikania, Gnetum u. a. charakteristisch.

2. Gefurchter Holzkörper (Fig. 12) kommt manchen Lianen, besonders Malpighiaceen und Apocynaceen zu. Das Cambium stellt auf mehreren Längslinien seine holzbildende Tätigkeit ein; so entstehen tiefe Furchen, die es mit Bastgewebe ausfüllt. Die Stämme erscheinen dabei meist außen fast glatt oder nur wenig gefurcht. Der Holzkörper erhält durch die Längsfurchung eine erhöhte Torsionsfähigkeit. Eine besondere Form dieser Stammstruktur ist bei den im tropischen Amerika sehr verbreiteten Bignonieen (Fig. 12) ausgeprägt. Im einfachsten Falle erhält hier der sekundäre Holzkörper vier über Kreuz stehende Furchen. Das Cambium wird dabei der Länge nach in 8 Längsstreifen zerschnitten, 4 im Grunde der Furchen befindliche schmale Streifen, die nach innen weniger Holz, nach außen entsprechend mehr Siebröhrengewebe abscheiden und 4 vor den Holzvorsprüngen liegende breitere, die umgekehrt mehr Holz und weniger Siebröhrengewebe erzeugen. Zwischen den Holzvorsprüngen und den Phloëmplatten der Furchen gleiten die Gewebe bei weiterer Verdickung aneinander auf Längsspalten vorbei. Manche Bignonieen erhalten zu den 4 primären Furchen später noch 4 damit regelmäßig gekreuzte sekundäre, dann 8 tertiäre Furchen usw. hinzu. Auch können die Furchen an ihren Seiten treppenförmig erweitert werden, indem dort eine fortgesetzte Abschneidung schmaler Streifen vom Cambium der Holzvorsprünge einsetzt.

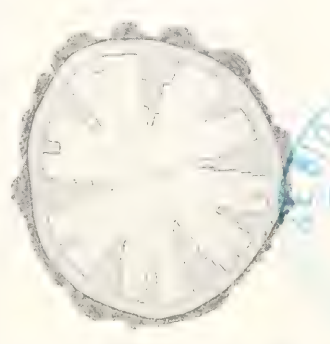


Fig. 12. Bignoniee. $^{2}/_{3}$.

3. Zerklüftung des Holzkörpers (Fig. 13) ist eine sehr eigenartige Erscheinung. Der Holzkörper wächst anfangs nach gewöhnlicher Art in die Dicke, wird dann aber meist gefurcht und nun beginnt vom Grunde der Furchen ausgehend infolge von Dehnung und Wucherung des hier befindlichen Cambiums oder des dünnwandigen Holzparenchyms eine Sprengung des geschlossenen Holzkörpers auf mehreren Längsstreifen sich zu vollziehen. Die dabei etwa entstehenden Spalten im Holz werden durch hineinwachsendes Parenchym sogleich wieder ausgefüllt und dieses Dilatationsparenchym teilt sich weiter, schiebt die Holzstränge auseinander und umgibt sie einseitig oder allseitig mit neuen Cambien, die nach ihrer Außenseite Siebröhrengewebe, nach innen später sich wiederum zerklüftendes Holz abscheiden. Solche Zerklüftung ist besonders charakteristisch für gewisse Malpighiaceen (Tetrapteris), für die

Sapindacee Serjania piscatoria, für Bauhinia, für einige Bignonieen und die Acanthacee Mendoncia.



Fig. 13. Serjania piscatoria (Sapindacee). ½.

4. Bildung sekundärer Holzbaststränge (Fig. 14, 15) im Umkreis des zuerst gebildeten und dann sein Wachstum einstellenden Holzkörpers aus Cambien, die nach-

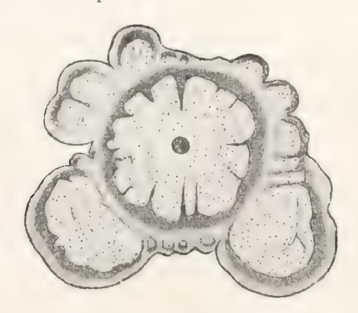


Fig. 14. Dalechampia ficifolia (Euphorbiacee). $^1/_1$.

träglich in der inneren Rinde, meist im Pericykelparenchym ihren Ursprung nehmen, tritt häufig und in den verschiedensten Familien auf, so bei Menispermaceen, Wistaria, Rhynchosia, Doliocarpus, Securidaca, Fragariopsis, Thinouia u. a. Die sekundären Holzbaststränge springen entweder nach außen als Längsrippen vor, oder sie umgeben gleichmäßig oder unregelmäßig den zentralen Holzkörper in Form von Ringzonen; die Menispermaceen folgen gleichzeitig dem Aristolochia-Typus, indem auch die zonenartig angeordneten sekundären Holzbastkeile wie die primären regelmäßig durch breite Markstrahlen getrennt werden. Die Anlagerung sukzessive gebildeter Holzbaststränge kann auch zur Bildung geflügelter oder bandförmiger Stämme führen.

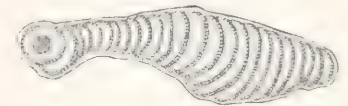


Fig. 15. Elissarrhena grandifolia (Menispermacee). $^1/_1$.

5. Zusammengesetzter Holzkörper (Fig. 16, 17) kommt nur bei zahlreichen Arten der Sapindaceen-Gattungen Serjania und Paullinia vor. Er liefert den schönsten und regelmäßigsten Kabelbau. Im Umkreis des zentralen Holzkörpers liegen 3 vorspringende oder mehrere im Ring stehende peripherische Holzkörper, die ein jeder für sich ringsum mit seinem eigenen Cambium in die Dicke wachsen. Sie entstehen dadurch, daß im ganz jungen Stengel der Gefäßbündelring peripherische Gefäßbündelringe nach außen in Form von vorspringenden Ausbuchtungen gleichsam abschnürt. Später können dann im Umkreis der gesonderten, mit Siebzonen umgebenen Holzkörper noch durch nachträgliche Cambiumbildung sekundäre Holzbaststränge hinzukommen (Fig. 17). Ueberhaupt muß bemerkt werden, daß in manchen Stämmen mehrere Typen zur Ausbildung gelangen.



Fig. 16. Serjania multiflora, junger Stamm (Sapindacee). $^1/_1$.

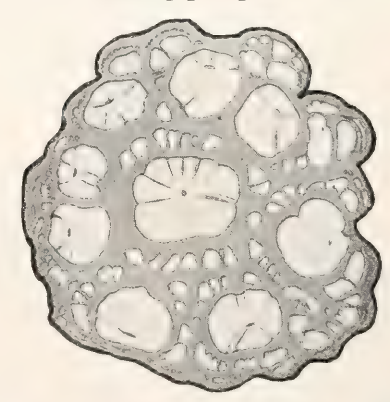


Fig. 17. Serjania multiflora, älterer Stamm. ¾.

Mit den hier aufgezählten Typen sind die Anomalien des Dickenwachstums keineswegs erschöpft, es gibt auch manche Abweichungen, die in ähnlicher Art bei nicht kletternden Holzgewächsen vorkommen und keine besondere Bedeutung für die Lianen haben.

Literatur. *Die umfangreiche neuere Literatur ist in den Werken von Goebel, Pfeffer, Jost, Solereder, Schenck zitiert.* — ***H. Mohl,***

Ueber den Bau und das Winden der Ranken und Schlingpflanzen. Tübingen 1827. — **Ch. Darwin**, *Die Bewegungen und Lebensweise der kletternden Pflanzen Uebersetzung. Stuttgart 1876.* — **H. Schenck**, *Beiträge zur Biologie und Anatomie der Lianen. Jena 1892 und 1893.* — **Derselbe**, *Einfluß von Torsionen und Biegungen auf das Dickenwachstum einiger Lianenstämme. Flora 1893.* — **O. Warburg**, *Einfluß der Verholzung auf die Lebensvorgänge des Zellinhalts. Ber. Deutsch. Bot. Ges. XI 1893, S. 425.* — **H. Schenck**, *Zerklüftungsvorgänge in anomalen Lianenstämmen. Jahrb. f. wiss. Bot. XXVII 1895, S. 581.* — **J. Massart**, *Sur la morphologie du bourgeon Annales du jard. bot. Buitenzorg XIII. Leiden 1895, S. 121.* — **K. Goebel**, *Organographie der Pflanzen. Jena 1898 bis 1901, S. 605 und 638.* — **W. Pfeffer**, *Pflanzenphysiologie II Leipzig 1904, S. 398.* — **L. Jost**, *Vorlesungen über Pflanzenphysiologie. Jena 1908, S. 542 und S. 576.* — **H. Solereder**, *Systematische Anatomie der Dicotyledonen. Stuttgart 1899 und Ergänzungsband 1908.* — **W. Dörries**, *Beiträge zur speziellen Anatomie der Lianen. Inaug. Diss. Göttingen 1910.* — **H. H. Zeijlstra**, *Bjdrage tot de Kennis der houtige Lianen. Diss. Amsterdamm 1911.* — **G. Haberlandt**, *Die Sinnesorgane der Pflanzen. Leipzig 1909, S. 524 und 531.*

H. Schenck.

Licht.

Das Wort „Licht" wird in dreifachem Sinne gebraucht: 1. Licht = Lichtquelle (Licht anzünden. Selbstleuchtende und beleuchtete Körper; vgl. die Artikel „Strahlung", „Lumineszenz", „Lichtreflexion", „Farbe" usw.). 2. Licht = Lichtwellen (Licht aussenden; vgl. den Artikel „Strahlende Aetherenergie" usw.). 3. Licht = Lichtempfindung (vom Licht geblendet werden; vgl. die Artikel „Gesichtssinn", „Photometrie" usw.). Ueber die chemischen usw. Wirkungen des Lichtes vgl. die Artikel „Photochemie", „Photographie", „Strahlungsumformungen" usw.

Lichtbeugung.

1. Huygenssches Prinzip. 2. Die Fresnelschen Beugungserscheinungen. 3. Die Fraunhoferschen Beugungserscheinungen. Opalescenz. 4. Gitter, Gitterspektra, Stufengitter. 5. Auflösungsvermögen optischer Instrumente, Fernrohr, Auge, Mikroskop. 6. Talbotsche Streifen.

1. Huygenssches Prinzip. Sobald der Vorgang der Lichtausbreitung als ein Fortschreiten von Wellen in irgendeinem Medium aufgefaßt wird, ergibt sich von selbst die Forderung, nun auch die bei der Strahlenbegrenzung auftretenden Erscheinungen aus dem Mechanismus einer Wellenbewegung heraus zu erklären. Wenn an einer Wasseroberfläche Wellen dadurch erregt werden, daß eine Stelle der Oberfläche durch einen eingetauchten Stab in rhythmische Bewegung gesetzt wird, so führt irgendeine von den Wellen bereits erreichte Stelle des Wassers genau die gleiche rhythmische Bewegung aus, wie dem Erregungszentrum mitgeteilt wurde. Es ist daher kein Grund vorhanden, nicht auch anzunehmen, daß jede dieser in Bewegung gesetzten Stellen ebenfalls Ausgangszentrum eines neuen Wellensystems wird. Dementsprechend hat Huygens die folgende Vorstellung über die Ausbreitung von Wellen entwickelt. Ist eine von A ausgehende Welle bis zur Grenze S (Fig. 1) vorgeschritten, so können wir jeden Punkt dieser Linie als selbständiges Erregungszentrum von Wellen ansehen und die wirkliche zur Erscheinung kommende Welle ist die Einhüllende aller von dieser Linie ausgehenden Elementarwellen. Es ist leicht zu übersehen, daß auf diese Weise in den einhüllenden Kurven tatsächlich genau die gleichen Wellenlinien erhalten werden, wie bei dem einfachen und direkten Fortschreiten der Wellen vom ersten Erregungszentrum aus zu erwarten sind. Dieses Prinzip, nach welchem die wirklichen Wellen als die Zusammenwirkung von einer großen Zahl von Elementarwellen aus dem vorangehenden Erregungszustand aufzufassen sind, wird das Huygenssche Prinzip genannt. Es ist noch der Erweiterung dahin fähig, daß es nicht nötig ist, die Zone, aus der man die Elementarwellen herstammend annimmt, aus lauter Punkten bestehend zu denken, die zu gleicher Zeit von der ursprünglichen Wellenerregung erreicht werden; es genügt eine ganz beliebige Zone aus dem Wellengebiet herauszugreifen, von allen ihren Punkten Elementarwellen ausgehend zu denken, um die wirkliche Wellenfront als Einhüllende dieser Elementarwellen zu finden. Dabei ist nur zu beachten, daß der Zeitpunkt des Beginnes jeder Elementarwelle für jeden Punkt der herausgegriffenen Zone durch seinen Abstand vom ursprünglichen

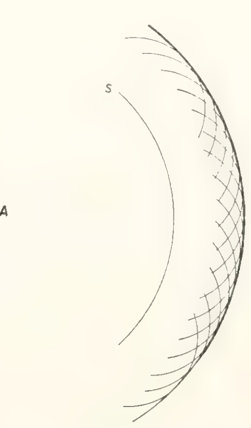


Fig. 1.

Erregungszentrum bestimmt wird. Im gleichen Augenblick sind daher die einzelnen Elementarwellen schon verschieden weit entwickelt, wie dies aus Fig. 2 ersichtlich ist, wo Z die beliebig herausgegriffene Zone ist und die Radien der einzelnen von $P_1, P_2, P_3 \ldots$ usw. ausgehenden Wellen in einem bestimmten Augenblick um so größer sind, je näher diese Punkte an dem ersten Erregungszentrum A liegen.

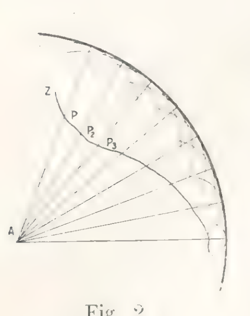


Fig. 2.

F r e s n e l hat dem Huygensschen Prinzip dadurch eine tiefere Bedeutung gegeben, daß er gezeigt hat, wie man in der Tat auch rechnerisch die Intensität des Lichtes an einem beliebigen Punkte bestimmen kann, indem man sie als Summenwirkung eines Systems kohärenter Elementarwellen (vgl. den Artikel „L i c h t i n t e r f e r e n z“), die sich nach den Gesetzen der Interferenz von Wellen vereinigen, ansieht.

Der Grundgedanke der F r e s n e l schen Rechnung ist der folgende. Ist eine Welle von A aus bis zur Fläche F (Fig. 3) vor-

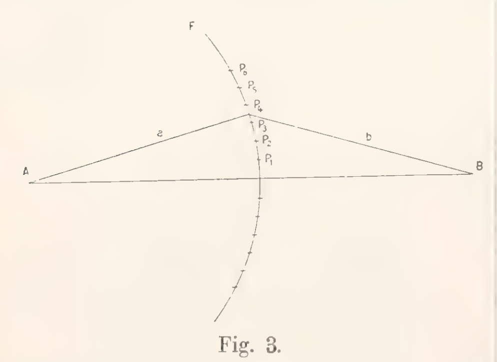


Fig. 3.

geschritten, so wird zur Berechnung der Lichtintensität in B eine Einteilung der Fläche F in ringförmige Zonen vorgenommen, so daß die innerste Zone begrenzt ist durch die Linie, auf welcher $a + b = AB + \frac{\lambda}{2}$ ist. Die hieran anschließende zweite Zone hat als Grenze die Linie, wo $a + b = AB + 2 . \frac{\lambda}{2}$ ist. Entsprechend hat die nte Zone als äußere Grenze die Linie, wo $a + b = AB + n\frac{\lambda}{2}$ ist. Zur Berechnung der Lichtwirkung in B wird nun angenommen, daß jede Zone dort einen Beitrag liefert, der 1. proportional ist der Fläche der Zone, 2. umgekehrt proportional ist dem Abstande b und 3. von einem Faktor k abhängt, der durch den Winkel zwischen a und b bestimmt ist, der auf der Zentralen AB am größten ist und der gleich Null wird, wenn b auf a senkrecht steht. Auf Grund dieser Annahme und unter Berücksichtigung der Forderung, daß immer zwei Wellenzüge, die die gleiche Intensität haben und um eine halbe Wellenlänge gegeneinander verschoben sind, sich gerade vernichten müssen, gelingt es dann Fresnel zu zeigen, daß immer eine Zone mit den anliegenden Hälften der Nachbarzonen sich gerade in ihrer Wirkung in B aufheben müssen. Es bleiben daher für die Rechnung nur noch die halbe Zentralzone und die halbe äußerste Zone übrig; von diesen beiden ist der Beitrag, den die letztere nach B hin liefert, sobald nur die Lichtübertragung nicht durch irgendwelche Abblendung, die nahe an die Zentralzone heranreicht, eingeschränkt ist, wegen des rasch kleiner werdenden Faktors k unwesentlich und kann vernachlässigt werden. Als Ergebnis der F r e s n e l schen Rechnung wird schließlich erhalten, daß die Lichtwirkung in B ganz wesentlich durch die Uebertragung durch die halbe Zentralzone allein zustande kommt; in Wirklichkeit ist also nur ein ganz schmales um AB herumgelagertes Bündel für das Fortschreiten des Lichtes nach B hin maßgebend und damit ist die Vorstellungsweise des H u y g e n s schen Prinzips mit der Existenz gerader Lichtstrahlen in Einklang gebracht.

Durch die F r e s n e l sche Berechnung ist aber noch keineswegs eine wirkliche Erklärung des Mechanismus der Wellenausbreitung gegeben, denn F r e s n e l muß noch einen Faktor k in die Rechnung einführen, dessen Notwendigkeit zwar auch vom mechanischen Standpunkt einleuchtend ist, aber dessen besondere Form nicht aus dem inneren Zusammenhang des die Wellen fortleitenden Mediums abgeleitet wird, sondern der nur mathematisch so gewählt wird, daß der ganze Gedankengang zum richtigen Ziele führt. Außerdem steckt in der F r e s n e l schen Berechnung noch eine Ungenauigkeit, denn es wird durch sie die Lichtintensität überall mit der Erfahrung in Uebereinstimmung gefunden, aber die Phase der Lichtbewegung ergibt sich nicht so, wie ohne Benutzung des H u y g e n s schen Prinzips zu erwarten wäre.

Eine vollständige und strenge Theorie der Fortpflanzung des Lichtes in Wellen kann nur gegeben werden, wenn man von den Wechselbeziehungen zwischen den Kräften, durch die das Licht seine Ausbreitung erfährt, von Punkt zu Punkt ausgeht. Eine solche Behandlung ist heutzutage auf Grund der Vorstellung, daß das Licht ein elektromagnetischer Vorgang ist, möglich, aber äußerst schwierig und bisher nur für wenige besonders einfache Fälle durchgeführt; in dieser Auffassung liegt dann zugleich mit eingeschlossen, daß eine Zurückführung der Lichtbewegung auf rein mechanische Zusammenhänge

im Sinne der Huygens-Fresnelschen Vorstellungen für unmöglich zu halten ist.

Unter diesen Verhältnissen ist es von großer Bedeutung, daß das Huygenssche Prinzip durch die Untersuchungen von Kirchhoff, Helmholtz und Abbe auf eine weit allgemeinere rein mathematische Basis gestellt worden ist. Unter Anwendung der Greenschen Sätze über den Zusammenhang zwischen Raumintegralen und Oberflächenintegralen gelingt es Kirchhoff zu zeigen, daß jede Funktion φ, die einen Vorgang darstellt, der sich mit endlicher Geschwindigkeit nach allen Richtungen im Raume gleichmäßig ausbreitet, und die daher der Gleichung $\frac{\partial^2\varphi}{\partial t^2} = \alpha^2\Delta\varphi$ genügt, sich auf die Form bringen läßt:

$$\varphi_{P(t)} = \frac{1}{4\pi}\int d\sigma\left[\varphi\frac{\partial 1/r}{\partial\nu} - \frac{1}{\alpha r}\frac{\partial\varphi}{\partial t}\cdot\frac{\partial r}{\partial\nu} - \frac{1}{r}\frac{\partial\varphi}{\partial\nu}\right]$$

Hier bedeutet α die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes, ferner $\varphi_{P(t)}$ den Lichtvektor im Punkte P zur Zeit t, wenn die Lichtbewegung zur Zeit t = o im Koordinatenanfang ihren Ausgang genommen hat und auf der vollkommen geschlossenen Oberfläche Σ, die den Koordinatenanfang umschließt, die Werte φ hat; ν ist die Normale zu dieser Oberfläche und r ist der Abstand zwischen P und den Oberflächenelementen $d\sigma$. P selbst liegt außerhalb der Oberfläche. Es muß unter diesen Verhältnissen die Wellenbewegung, um vom Koordinatenanfang nach P hinzugelangen, vorher aus der ganzen Oberfläche Σ herausgetreten sein, indem sie die einzelnen Elemente der Oberfläche zu gleichen oder auch verschiedenen Zeiten, da die Oberfläche ganz beliebig gewählt sein kann, passiert hat, und die Formel bedeutet dann, daß der Zustand in P vollkommen genau berechnet werden kann, wenn man die Zustände in allen Punkten der Oberfläche Σ kennt, ohne daß man dann auf den Ausgangspunkt der Bewegung zurückzugehen braucht. Dieser Kirchhoffsche Ausdruck ist daher die strenge Formulierung des Huygensschen Prinzips, aus dem heraus sich dann auch die richtige Bestimmung des Fresnelschen Faktors k gewinnen läßt und der zugleich mit den Forderungen der elektromagnetischen Lichttheorie sich in Einklang bringen läßt. Ist im besonderen φ als periodische Funktion von der Form $\varphi = A\cos 2\pi\left(\frac{t}{\tau} - \frac{r}{\lambda}\right)$ gewählt, so wird auch $\varphi_{P(t)} = C\int\cos 2\pi\left(\frac{t}{\tau} - \frac{r'}{\lambda}\right)d\sigma$. Im übrigen schließt sich die spezielle Ausführung der Rechnung den Fresnelschen Gedankengängen an, insbesondere bleibt die Fresnelsche Zoneneinteilung auch bei dieser Darstellung erhalten. Daher bleibt es zulässig, bei allen elementaren Betrachtungen in diesem Gebiete die einfachen Huygens-Fresnelschen Vorstellungen zu benutzen und an Hand derselben eine Uebersicht über alles Wesentliche der Erscheinungen zu geben.

2. Die Fresnelschen Beugungserscheinungen. Sobald die von einem Punkte A (Fig. 3) ausgehenden Lichtwellen nicht in ihrer ganzen Ausdehnung zur Ausbildung gelangen, sondern durch irgendwelche Blenden oder Schirme teilweise gestört werden, so muß dadurch die Lichtwirkung in B ebenfalls gestört werden, selbst in dem Falle, wo auf der geraden Verbindungslinie von A nach B kein störender Schirm sich befindet. Die dadurch entstehenden Erscheinungen der Lichtverteilung in der Nähe der geometrischen Schattengrenze von Schirmen und Blenden heißen Beugungserscheinungen, und zwar, weil sie zuerst von Fresnel untersucht und vollständig erklärt wurden, die Fresnelschen Beugungserscheinungen. Sie werden beobachtet, indem man an die Stelle von B einen weißen Schirm setzt und eine möglichst punktförmige Lichtquelle in A verwendet. Bringt man dann einen undurchsichtigen Schirm mit irgendwelchen Oeffnungen oder sonst irgendeinen schattenwerfenden Körper zwischen A und den Schirm B, so entspricht das Schattenbild auf B nicht dem geometrischen Schatten, sondern es ist ein von hellen und dunklen Säumen umgebenes Schattenbild, in dessen Inneren sich unter Umständen auch noch helle und dunkle Streifen befinden können. Verwendet man einen durchscheinenden Schirm, z. B. die Mattscheibe eines Photographenapparates, so kann man die Feinheiten der Erscheinung von der Rückseite her mit einer Lupe noch bedeutend besser erkennen und es zeigt sich, daß man dann die Mattscheibe auch ganz fortnehmen kann; das Beugungsbild bleibt auch dann in der Gesichtsfeldebene der Lupe sichtbar. Diese Beobachtungsweise gestattet die schärfste Beobachtung und Ausmessung der ganzen Erscheinung, aber es ist wesentlich, im Auge zu behalten, daß die Fresnelschen Beugungserscheinungen zustande kommen ohne Verwendung irgendwelcher Linsen; sie sind nachweisbar an jeder Stelle des Beobachtungsraumes, und die Lupe dient nur zur Unterstützung unseres Auges bei ihrer genauen Erkennung.

Die wichtigsten Fresnelschen Beugungserscheinungen sind folgende:

1. Bei genügend punktförmiger Lichtquelle zeigen sich die Schatten aller schattenwerfenden Körper nach außen, d. h. in dem Teil, wo schon volles Licht sein sollte, umsäumt von mehreren hellen und dunklen Streifen, die der Schattengrenze folgen und nach außen hin rasch schwächer werden.

2. Ein schmaler, streifenförmiger Schirm (Nähnadel) zeigt außer diesen außerhalb des Schattens liegenden Fransen im Innern des Schattens auch helle und dunkle Streifen symmetrisch zur Schattenmitte. In dieser Mitte selbst liegt stets ein heller Streifen. Die Breite dieser Streifen ist um so größer, je schmaler der Schirm ist.

3. Ein schmales Fenster in einem undurchsichtigen Schirm zeigt im Schattenbilde

an der Innenseite des Fensters die gewöhnlichen Fransen; an der Außenseite sind ebenfalls dunkle und helle Streifen. Je schmaler das Fenster gemacht wird, desto deutlicher und breiter werden diese letzteren, während die inneren Fransen sich ineinanderschieben und die Mitte abwechselnd heller und dunkler erscheinen lassen. Ist das Fenster sehr schmal, so ist im Schattenbilde das Bild des Fensters gleichmäßig hell und stark verbreitert.

4. Eine kleine runde Oeffnung in einem Schirm erscheint als heller Kreis, umgeben von hellen und dunklen Ringen, die Mitte des Kreises kann dunkler oder auch heller sein als der Rand.

5. Eine kleine kreisrunde Scheibe gibt einen ähnlichen Schatten, der auch von hellen und dunklen Ringen umsäumt ist, aber die Mitte des Schattens ist stets heller als der Rand; um so heller, je kleiner die Scheibe ist.

Die vollständige Erklärung dieser Beugungserscheinungen ergibt sich aus der in Figur 3 angegebenen Berechnungsweise der Helligkeit in einem Punkt B durch Vermittlung der Fresnelschen Zoneneinteilung. Wir sahen dort, daß bei ungestörter Ausbreitung des Lichtes die Wirkung der einzelnen Zonen sich paarweise aufhebt und daß nur die Wirkung der halben Zentralzone übrig bleibt. Dieses sich gegenseitige Aufheben der einzelnen Zonen hört natürlich sofort auf, sobald sie durch eingeschaltete Blenden nicht voll zur Entfaltung kommen. Die vollständige rechnerische Bestimmung der einzelnen Fresnelschen Beugungserscheinungen führt im allgemeinen zu sehr verwickelten Rechnungen, jedoch lassen sich einige einfache Erscheinungen auch schon unmittelbar aus dem Prinzip der Methode erkennen.

Haben wir einen Schirm mit einer kleinen kreisförmigen Oeffnung, so ist für einen Punkt B, der auf der Zentralen von A durch die Mitte der Oeffnung liegt, die Helligkeit leicht zu schätzen. Führen wir von einem solchen Punkte B die Fresnelsche Zoneneinteilung aus, so kommt es darauf an, wieviel Zonen in der Oeffnung Platz haben. Sind es gerade eine ganze Anzahl von Zonen, so bleibt für die Wirkung in B die halbe innerste und die halbe äußerste Zone übrig und je nach der Anzahl der Zonen treffen die Wirkungen dieser beiden Halbzonen entweder mit gleicher Phase oder entgegengesetzter Phase in B ein, verstärken sich also oder schwächen sich. Hat die äußerste Zone nur noch zur Hälfte in der Oeffnung Platz, so kommt die halbe Zentralzone allein in B zur Wirkung. Können wir also die Oeffnung im Schirm kontinuierlich vergrößern, so muß die Helligkeit in B abwechselnd größer und kleiner werden und zwar ist die Maximale Helligkeit größer, als wenn das Licht ohne durch den Schirm gestört zu sein, nach B hingelangt, und die Minimale ist kleiner. Da die Lage der Zonen in der Schirmöffnung von dem Abstande zwischen Schirm und dem Punkte B berührt, so können wir die gleiche Beobachtung des Heller- und Dunklerwerdens der Beleuchtung in B auch machen, wenn wir B auf der Zentralen vom Schirm immer weiter fortrücken lassen. Sendet die Lichtquelle kein einfarbiges sondern weißes Licht aus, so wird die Beleuchtung in B, da die Zoneneinteilung von der Wellenlänge abhängt, farbig und beim Fortrücken von B wechseln die Farben, da die Minima der Helligkeit für verschiedene Farben an verschieschiedenen Stellen liegen.

Ganz anders ist das Verhalten der Helligkeit, wenn wir nur einen kleinen kreisförmigen Schirm haben und wieder einen Punkt der Zentralen betrachten. In diesem Falle können wir die Zoneneinteilung so führen, daß wir erst am Rande des Schirmes beginnen und von hier aus die ringförmigen Zonen nach dem gleichen Einteilungsprinzip ausführen. Die ganzen Schlußweisen lassen sich dann in genau gleicher Weise verwenden und wir erhalten das Ergebnis, daß für die Wirkung in B die innerste, halbe Zone, die also jetzt dem Schirmrande sich anschließt, allein bestimmend ist. Diese aber bewirkt stets Helligkeit in B und diese Helligkeit ist, wenn der Durchmesser des Schirmes nur ganz wenige Zonenbreiten beträgt, fast ebenso groß, als wenn der Schirm gar nicht da wäre. Wir erhalten also das überraschende Ergebnis, daß die Mitte des geometrischen Schattens eines kleinen, genau kreisförmigen Schirmes stets fast ebenso hell ist, als wenn der Schirm gar nicht da wäre. Dieser Schluß wurde zuerst von Poisson gezogen und von Arago auch experimentell bestätigt.

Für die weitere Betrachtung der Beugungserscheinungen auch außerhalb der Symmetrieachse, wollen wir uns auf den auch experimentell am schärfsten zu beobachtenden Fall beschränken, daß wir als Lichtquelle eine leuchtende, gerade Linie (Spalt) haben und daß die Grenzlinien der Schirme dem Spalt parallel sind. Die Wellenfläche ist dann eine Cylinderfläche und wir können sie nach dem Huygensschen Prinzip als aus lauter, der ursprünglichen Lichtlinie gleichwertigen lichtsendenden Linien bestehend ansehen. Wir haben auch dann die Zylinderfläche in Zonen einzuteilen und die Einzelwirkung dieser Zonen zu summieren.

Das Ergebnis der Summierung der von den einzelnen Elementen ausgehenden Wirkungen wird in leichter Weise überblickt, wenn wir ein von Cornu angegebenes geometrisches Verfahren anwenden. Jede in einem Punkte hervorgerufene Lichtschwingung ist darstellbar durch die Form $F = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{\tau} - \frac{r}{\lambda}\right)$; hier bedeutet A die Amplitude der Schwingung, t die Zeit, τ die Schwingungsdauer, λ die Wellenlänge und r den Weg, den das Licht in der Zeit t schon zurückgelegt hat (vgl. den Artikel „Wellenausbreitung"). Hieraus folgt auch

$$F = A \sin 2\pi \frac{t}{\tau} \cos 2\pi \frac{r}{\lambda} - A \cos 2\pi \frac{t}{\tau} \sin 2\pi \frac{r}{\lambda}$$

Setzt man nun $A' = A \cos 2\pi \frac{r}{\lambda}$, $A'' = A \sin 2\pi \frac{r}{\lambda}$ so erhält man:

$F = A' \sin 2\pi \frac{t}{\tau} - A'' \cos 2\pi \frac{t}{\tau}$; das heißt die

Schwingung erscheint als zusammengesetzt aus zwei Einzelschwingungen, die um eine Viertelschwingung gegeneinander verschieden sind, und es ist $A^2 = A'^2 + A''^2$. Treffen nun zwei Schwingungen F_1 und F_2 gleicher Schwingungsrichtung aber ungleicher Phase zusammen, so kann man beide in dieser Weise in zwei Komponenten zerlegen und die Komponenten unmittelbar addieren. Eine leichte Rechnung ergibt dann für die Amplitude der resultierenden Schwingung $A^2 = (A'_1+A'_2)^2 + (A''_1+A''_2)^2 = A_1^2+A_2^2 + 2\ A_1A_2 \cos \frac{2\pi}{\lambda}(r_1-r_2)$. Das heißt aber A ist die Seite eines Dreiecks, dessen andere Seiten A_1 und A_2 sind, welche selbst einen Winkel $180-\frac{2\pi}{\lambda}(r_1-r_2)$ einschließen (Fig. 4). Fügt man also die Amplituden der beiden Schwingungen so aneinander an, daß sie wie in Figur 4

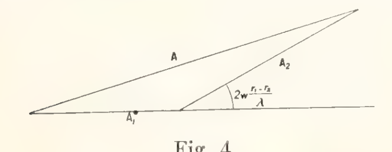


Fig. 4.

einen Winkel gleich ihrer Phasendifferenz miteinander bilden, so ergibt die Verbindungslinie der freien Enden der beiden Strecken die Größe der resultierenden Amplitude, und zugleich ist der Winkel, den die Resultante mit der ersten Strecke bildet, gleich der Phasendifferenz zwischen A und A_1. Nach diesem Verfahren können wir aber augenscheinlich sofort beliebig viele Schwingungen zusammensetzen.

Wenden wir uns jetzt zur Berechnung der Wirkung der von A ausgehenden Zylinderwelle im Punkt B (Fig. 5), so teilen wir die Wellenfläche in gleiche unendlich schmale Streifen

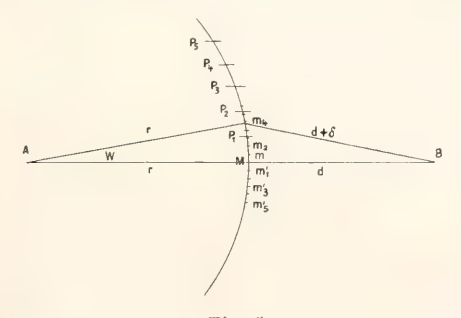


Fig. 5.

von der Mitte M ausgehend nach oben hin durch die Teilpunkte m_1, m_2, m_3 usw. und nach unten hin durch m'_1, m'_2, m'_3 . . ., und nun addieren wir geometrisch. Da alle die unendlich schmalen Streifen der Zylinderwelle gleichwertige Lichtlinien sind, so können wir annehmen, wenn wir nur B hinreichend weit entfernt von M uns denken, daß die von den einzelnen Streifen in B erzeugten Amplituden gleich groß sind, aber ihre Phasen sind untereinander verschieden, denn die Unterschiede der einzelnen Weglängen in B sind nur sehr gering, aber für die Phasen sind schon Unterschiede von der Größe der Lichtwellenlänge maßgebend. Wir haben also, um alle Einzelwirkungen zu addieren, lauter gleiche Amplituden aneinander zu setzen, $\mu\mu_1$, $\mu_1\mu_2$, $\mu_2\mu_3$ . . . (Fig. 6), aber jede spätere ein wenig gedreht gegen die vorangehende.

Es entsteht eine Spirale, wie Figur 6, die sich asymptotisch um einen Grenzpunkt K herumwindet. Die Verbindungslinie des Anfangspunktes μ mit dem Punkte K ist die resultierende Amplitude aller von den Elementen $(m_n\, m_{n+1})$ erzeugten Wirkungen. Für die untere Hälfte der Zylinderwelle erhalten wir

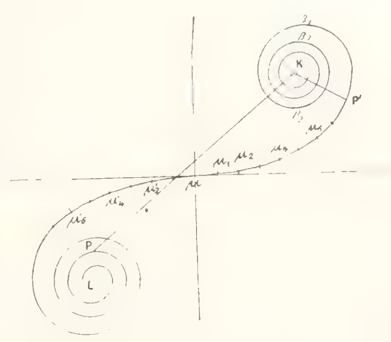


Fig. 6.

eine ganz symmetrisch liegende Kurve mit dem Asymptotenpunkte L. Eine weitere Einsicht über die Bedeutung dieser Kurven erhalten wir, wenn wir über die Einteilung der Zylinderwelle in unendlich schmale Streifen nun noch die Fresnelsche Zoneneinteilung überlagern durch die Teilpunkte P_1, P_2, P_3 . . . (Fig. 5), so daß also $P_1B = MB + \frac{\lambda}{2}$, $P_2B = MB + 2\frac{\lambda}{2}$; $P_3B = MB + 3\frac{\lambda}{2}$. . . . Die von P_1 ausgehende Wirkung ist in B gegenüber der von M ausgehenden um $\frac{\pi}{2}$ in der Phase zurück, also entspricht dem P_1 in der Kurve Figur 6 der Punkt β_1 dem P_2 β_2, P_3 β_3 usw.

Die genaue Gestalt der Kurve ergibt sich durch folgende Rechnung. x und y seien die Koordinaten der Kurve, $d\sigma$ ein Längenelement der Kurve und ds ein Längenelement der Zylinderwelle in Figur 5. Es sind dann $d\sigma$ und ds, und ebenso auch σ und s selbst einander proportional, also ist:

$$d\sigma = \sqrt{dx^2 + dy^2} = k ds,$$

wo k ein Proportionalitätsfaktor ist. Ist ferner $MB = d$, $AM = r$ und $B_m = d + \delta$, Winkel $mAM = \omega$, so ist:

$$(d + \delta)^2 = (r + d)^2 + r^2 - 2(r + d)r \cos \omega.$$

Man kann $\cos \omega$ in eine Reihe entwickeln und vernachlässigt man dann ω^4 und δ^2 und setzt $w = \frac{s}{r}$, so wird $\delta = \frac{r+d}{2\,rd} s^2$ und die Phasendifferenz zwischen der von M und von m nach B gelangenden Welle wird $\varphi = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{r+d}{2\,r\lambda d} s^2 = c\, s^2$,

wo α zur Abkürzung eingeführt ist. Es muß daher nach dem früheren jetzt $\operatorname{tg} 2\pi\varphi = \operatorname{tg} 2\pi\alpha s^2 = \frac{dy}{dx}$, d. h. gleich der Neigung der Kurve gegen die X-Achse sein. Wir haben daher zwei Gleichungen für dy und dx, aus denen sich diese leicht selbst finden lassen und durch Integration erhalten wir:

$$x = k \int_0^s ds \cos \alpha s^2; \; y = k \int_0^s ds \sin \alpha s^2$$

Diese Integrale sind als Fresnelsche Integrale bekannt; hat man ihre Werte zahlenmäßig in Tabellen zusammengestellt, wie es von Fresnel und ausführlicher von Gilbert geschehen ist, so kann man die Kurve vollständig zeichnen und erhält so in der Tat die in Figur 6 gezeichnete Kurve.

An der Hand der Kurve übersehen wir nun leicht den Charakter der Beugungserscheinungen für verschiedene Fälle.

1. Ein einseitig begrenzter Schirm (Fig. 7). Betrachten wir einen

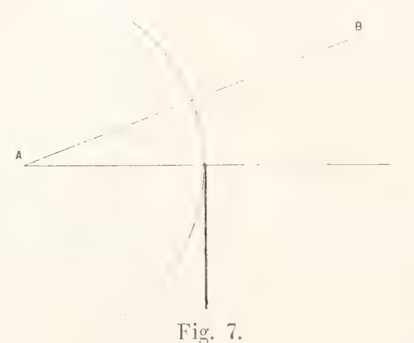


Fig. 7.

Punkt B außerhalb des geometrischen Schattens, so würde für diesen bei der Einteilung der Zylinderwelle nach Figur 5 der obere Ast der Kurve vollständig erhalten, der untere Ast aber nur zum Teil, das letzte Ende bis zum Punkte L fehlt. Die resultierende Amplitude, deren Quadrat der Helligkeit in B entspricht, ist also dargestellt durch eine Strecke von K aus bis zu einem Punkte P auf dem unteren Aste der Kurve. Rücken wir nun mit B näher zur Grenze des geometrischen Schattens heran, so wandert P auf dem unteren Aste nach μ hin und wir sehen, daß die Helligkeit, die stets der Sehne KP entspricht, bei der Annäherung an die Schattengrenze abwechselnd zu- und abnimmt. Das heißt außerhalb der Grenze des geometrischen Schattens lagern sich dem Schatten abwechselnd helle und dunkle Streifen vor. Rücken wir mit B in den geometrischen Schatten hinein, so wandert P nach dem oberen Ast hinüber nach P^1 und wir schließen, daß von nun an innerhalb des geometrischen Schattens nur noch eine gleichmäßige Abnahme der Helligkeit eintritt. Eine Vorstellung von der Breite der Beugungsstreifen und der Schnelligkeit mit der das Licht innerhalb des geometrischen Schattens abnimmt, erhalten wir, wenn wir die Fresnelschen Zonen auf der Zylinderwelle hergestellt denken, und dann bedenken, daß den Zonengrenzen die Punkte β_1 β_2 . . . auf der Kurve entsprechen.

2. Ein schmales Fenster in einem Schirm, ein Spalt. In diesem Falle entspricht der Breite des Spaltes eine bestimmte Länge auf der Kurve Figur 6. Die Sehne, die zu dem Kurvenabschnitt von dieser Länge gehört, entspricht stets der Amplitude der Lichtwirkung in B. Bewegen wir also B von einer Stelle, die tief im Bereich des geometrischen Schattens liegt, nach der Schattengrenze hin, so schiebt sich der Kurvenabschnitt von dem Innern der Spirale heraus allmählich vor. Da seine Länge unverändert ist, die Spirale aber immer weitere Windungen macht, so muß es vorkommen, daß dieser Kurvenabschnitt das eine Mal gerade eine ganze Zahl von Windungen umfaßt, das andere Mal aber eine halbe Windung weniger, wie Figur 8 a und b zeigen. Wir schließen daher: im geometrischen

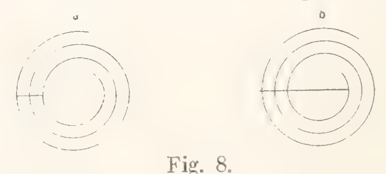


Fig. 8.

Schatten liegen in diesem Falle eine Reihe heller und dunkler Streifen, deren Helligkeit, je tiefer man in den Schatten hineinrückt, rasch abnimmt. Erreicht B die Grenze des geometrischen Schattens, so erreicht das vordere Ende des Kurvenstückes den Punkt μ. Die Helligkeit an dieser Stelle hängt offenbar sehr von der Spaltbreite ab, denn ist der Spalt so schmal, daß das Kurvenstück nur bis β_1 reicht, so ist die Helligkeit hier sehr groß; reicht das Kurvenstück bis β_2 so ist die Helligkeit hier schon recht klein. Die Helligkeit an den der freien Spaltöffnung gegenüberliegenden Stellen läßt sich in gleicher Weise aus der Lage des Kurvenstückes ermitteln und es zeigt sich, daß auch hier je nach der Spaltbreite sehr wechselnde Helligkeiten auftreten können. Von besonderem Interesse ist noch der Fall, daß der Spalt sehr schmal ist, so daß das Kurvenstück nur ganz wenige der Punkte μ zugleich überdeckt. Dann kann das Kurvenstück von μ aus nach beiden Seiten hin ein erhebliches Stück verschoben werden, ohne daß die zugehörige Sehne ihre Länge merklich ändert. Es findet dann also eine gleichmäßige Ausbreitung von Helligkeit nach beiden Seiten weit über die geometrische Projektion der Spaltöffnung hinaus statt, welcher sich dann erst außen die hellen und dunklen Streifen, die jetzt auch entsprechend breit sind, anschließen.

Aus der gleichen Kurve läßt sich auch die Erscheinung bei einem schmalen Schirm ableiten. In diesem Falle fehlt ein Abschnitt von der der Schirmbreite entsprechenden Länge in der Kurve und die Wirkung in B setzt sich aus den beiden Teilen zusammen, die zwischen den Punkten K und L einerseits und den Endpunkten des Kurvenabschnittes andererseits liegen. Auch hier zeigt eine einfache Ueberlegung, daß tatsächlich die oben bereits beschriebene Erscheinung zustande kommen muß.

Der allgemeine Fall, daß nicht eine Zylinder-

welle, sondern eine Kugelwelle vorliegt, setzt der Rechnung größere Schwierigkeiten entgegen, deswegen sei hier nur darauf hingewiesen, daß auch dieser Fall auf die Fresnelschen Integrale führt, nur setzt sich der Ausdruck für die Schwingungsamplitude im Beobachtungspunkt in komplizierterer Weise aus Fresnelschen Integralen zusammen. Die Rechnungen führen aber in der Tat stets auf die oben bereits beschriebenen Erscheinungen.

3. Die Fraunhoferschen Beugungserscheinungen. Bei den Fresnelschen Beugungserscheinungen handelte es sich um Licht, das von einem Punkte ausging und in seiner Ausbreitung durch schattenwerfende Gegenstände gehemmt wurde; die Fraunhoferschen Beugungserscheinungen werden dagegen beobachtet an Lichtwellen, die nach einem Bildpunkte hingerichtet sind und auf diesem Wege durch Blenden beeinflußt werden. Entwerfen wir von einem leuchtenden Punkte P (Fig. 9) ein Bild B,

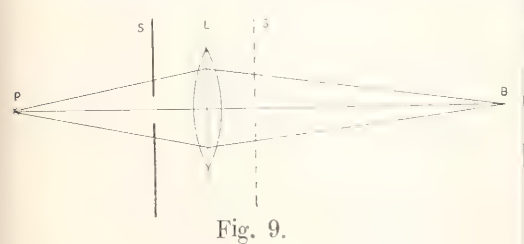


Fig. 9.

so wird durch jede Blende S oder S′, die an irgendeiner Stelle vor oder hinter der Linse den abbildenden Strahlenkegel auf ein schmales Bündel einschnürt, das Bild in B durch Lichtbeugung stark verändert, um so stärker je enger die Blende ist; aber auch bei weiten Blenden verschwindet die Entstellung des Bildes durch Lichtbeugung niemals ganz. Da stets die Begrenzung der Linse oder des optischen Systems selbst schon eine Abblendung des Strahlenkegels darstellt, so muß ganz allgemein jedes optische Bild in gewissem Grade durch die Lichtbeugung gegenüber der rein geometrischen Abbildung modifiziert sein (vgl. hierzu die Artikel „Abbildungslehre“ und „Optische Instrumente“). Zur Beobachtung und Untersuchung der Fraunhoferschen Beugungserscheinungen eignet sich für objektive Darstellung am besten die Anordnung der Figur 10. B ist hier die Lichtquelle (z. B. der positive Krater einer Bogenlichtlampe), S ist ein Spalt oder eine kleine Lochblende, durch die das Licht austritt und die als leuchtendes Objekt dient. Durch die Linse L wird in S′ ein Bild von S entworfen, und zwischen L und S′ ist dann stets eine Stelle B′, von der ein Bild von B entsteht, wo also der Strahlenkegel am engsten ist. An dieser Stelle B′ wird die Blende aufgestellt, deren Beugungswirkung gezeigt werden soll, denn auf diese Weise erhält man durch eine kleine Blende relativ viel Licht, also eine verhältnismäßig lichtstarke Erscheinung. Für die subjektive Beobachtung bedient man sich eines Fernrohrs, mit dem man einen fernen Lichtpunkt ansieht, und vor dessen Objektiv man einen Schirm mit einer oder mehreren Oeffnungen anbringt; im Gesichtsfelde erscheint dann das Bild des Lichtpunktes durch die Beugungswirkung dieser Oeffnungen entstellt. An Stelle des Fernrohres kann auch unser Auge treten; wir brauchen nur durch eine sehr kleine Oeffnung in einem Kartenblatt nach einem Lichtpunkt, den wir durch ein mit einer Nadel durchlochtes und vor eine Lampe gehaltenes Kartenblatt erhalten, zu blicken, um ohne weiteres die durch die kleine Oeffnung bewirkte Fraunhofersche Beugungserscheinung zu sehen.

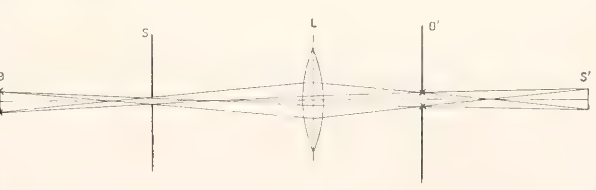


Fig. 10.

Die wichtigsten Erscheinungen, die auf diese Weise gesehen werden, sind bei Anwendung von einfarbigem Licht folgende:

1. Die beugende Oeffnung ist ein Kreis: an Stelle des Lichtpunktes tritt im Bilde ein kreisrundes helles Scheibchen, das von hellen und dunklen Ringen umgeben ist. Je kleiner die Oeffnung ist, um so größer sind der Durchmesser des Scheibchens und der Ringe.

2. Eine spaltförmige Oeffnung gibt bei einer linienförmigen Lichtquelle, die dem Spalt parallel ist, als Bild der Lichtquelle einen hellen verbreiterten Streifen, der beiderseits von hellen und dunklen Streifen umgeben ist.

3. Bei punktförmiger Lichtquelle gibt ein Parallelogramm ein System von zwei sich kreuzenden Reihen von hellen und dunklen Feldern, und in den Winkeln zwischen den Reihen treten ebenfalls noch helle Felder auf (Fig. 11). Zu beachten ist die Lage dieser Reihen gegenüber der Lage der Oeffnung; die Richtung der Reihen steht senkrecht zu den Parallelogrammenseiten, und

die Ausdehnung der Felder ist größer in der Reihe, die der schmaleren Ausdehnung des Parallelogramms entspricht. Die gegenüberliegenden Parallelogrammseiten wirken hier wie die Seiten eines Spaltes.

4. Ein Dreieck gibt als Bild eines Lichtpunktes einen sechsstrahligen Stern, bei dem in den Winkeln zwischen den Strahlen ebenfalls noch helle Lichtflecke auftreten.

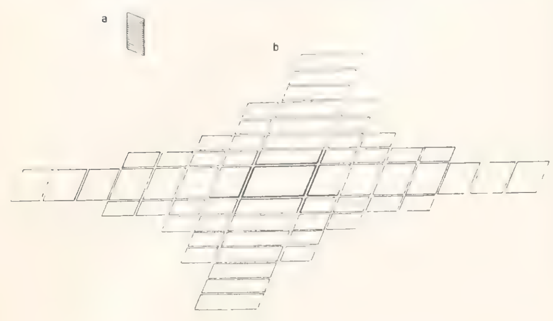


Fig. 11.

Weitere Beugungsfiguren, die durch das Zusammenwirken mehrerer Oeffnungen entstehen, sind durch die Figuren 12, 13, 14 dargestellt. Hier sind stets unter a die Oeffnungen und unter b das Beugungsbild dargestellt.

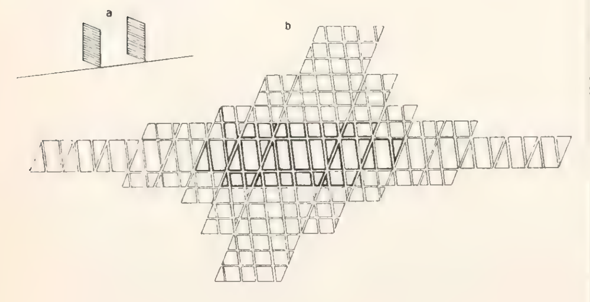


Fig. 12.

Die Zahl dieser schönen Beugungsbilder läßt sich natürlich durch die Wahl und Anordnung der Oeffnungen beliebig vermehren. Die Erscheinungen gehören zu den schönsten, die sich in der Optik beobachten lassen und werden bei der Beobachtungsweise mit einem Fernrohr außerordentlich lebhaft und scharf sichtbar, so daß sie sehr genau ausgemessen werden können. Wird nicht einfarbiges Licht verwendet, sondern weißes, so haben die Beugungsbilder für die verschiedenen Farben ungleiche Ausdehnung; für die blauen sind sie kleiner, für rot am größten. Durch Nebeneinanderlagerung der verschieden gefärbten Bilder entstehen dann Farbenmischungen, durch die die äußeren Teile des Bildes mehr oder weniger verwischt werden, in der gleichen Weise wie es bei den Interferenzstreifen von Fresnel und den Newtonschen Farbenringen zu beobachten ist (vgl. den Artikel „Lichtinterferenz").

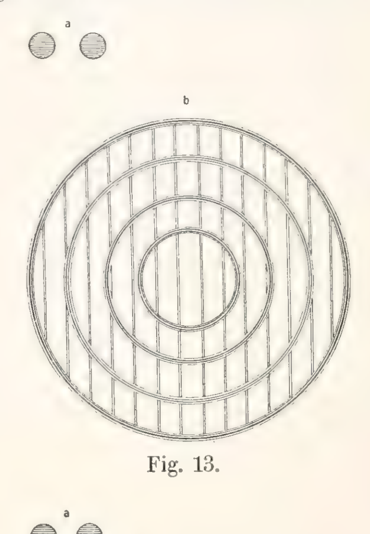


Fig. 13.

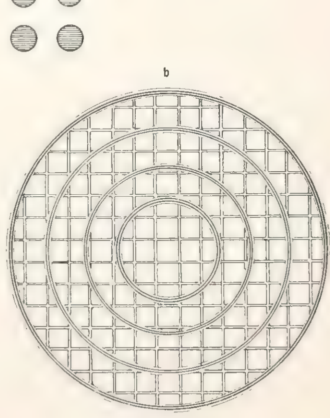


Fig. 14.

Die mathematische Berechnung der Fraunhoferschen Beugungserscheinungen kann durch folgende Ueberlegung auf eine sehr einfache Form gebracht werden. Die Erscheinungen werden sichtbar in der Bildebene einer Linse und dabei ändert es wohl die Dimensionen aber nicht den Charakter der Erscheinung, wenn der abgebildete Lichtpunkt verschieden weit von der Linse fortgerückt wird, also können wir ihn auch unendlich weit fortrücken, was dadurch experimentell ermöglicht wird, daß er in die Brennebene eines Kollimatorrohres verlegt wird. Steht dann die Blende vor der Linse des Beobachtungsfernrohres, so wird sie von parallelen Strahlen getroffen und es werden auch nur solche Strahlen in einem Punkte der Bildebene vereinigt, die die Blende in gleicher Richtung verlassen haben. Wenn jetzt z. B. in Figur 15 A B die Grenzen eines Spaltes sind, so wird der Raum zwischen A B durch eine ebene Wellenfläche ausgefüllt;

von allen Punkten dieser Fläche gehen neue ebene Wellen aus. Greifen wir jetzt eine beliebige Richtung, die gegen die Einfallsrichtung um den Winkel α geneigt ist, heraus und fällen das Lot A D von A aus auf den durch B gehenden Randstrahl, dann ist $BD = \delta = a \sin \alpha$ gleich der Gangdifferenz der beiden Randstrahlen. Ist diese Gangdifferenz gerade eine ganze Wellenlänge, so beträgt die Gangdifferenz zwischen einem Randstrahl und dem mittelsten Strahl des Bündels eine halbe Wellenlänge. Wir können

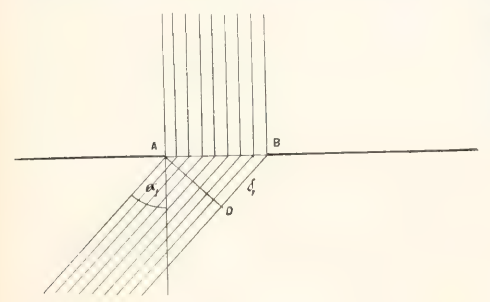


Fig. 15.

dann das ganze Bündel durch den mittelsten Strahl in zwei Hälften teilen, derart, daß jedem Strahl der einen Hälfte ein solcher der anderen Hälfte zugeordnet ist, der eine Gangdifferenz von $\frac{\lambda}{2}$ gegen ihn hat. Diese Strahlen werden sich also paarweise durch Interferenz auslöschen, in dieser Richtung wird daher keine Lichtwirkung auftreten. Ist die Gangdifferenz zwischen den Randstrahlen $\delta = a \sin \alpha = m\lambda$, wo m irgendeine ganze Zahl ist, so können wir die ganze Spaltbreite stets in m Streifen teilen, und auf jeden Streifen läßt sich die obige Ueberlegung anwenden. Es zeigt sich also, daß Dunkelheit herrschen muß jedesmal, wenn $\sin \alpha = \frac{m\lambda}{a}$ ist. Dazwischen liegen die Lichtmaxima an den Stellen, wo $\sin \alpha = \frac{2m-1}{2} \frac{\lambda}{a}$ ist. Ist das Beobachtungsfernrohr um den fest aufgestellten Spalt, auf den das Licht aus einem Kollimator senkrecht auffällt, drehbar, so erhält man, wenn man es der Reihe nach auf diese Winkel einstellt, die entsprechenden Maxima und Minima in die Mitte des Gesichtsfeldes. Mißt man die Spaltbreite a und die Winkel α, so kann man daraus die Wellenlänge leicht bestimmen.

Diese elementare Berechnungsweise läßt sich aber nur für ganz wenige Fälle durchführen; für die übrigen Fälle muß auf das Huygenssche Prinzip zurückgegriffen werden. Nach diesem kann die Wirkung in einem Punkte P_1 stets als Summe von Einzelwellen angesehen werden, die nicht vom Lichtpunkte P_0 selbst, sondern von allen Punkten einer zwischen ihnen liegenden Fläche S ausgegangen sind (Fig. 16). Die allgemeine Kirchhoffsche Formel für das Huygenssche Prinzip läßt sich in der Tat stets auf die Form bringen

$$\varphi = C \int \cos (K (r_0 + r_1) - K't)\, ds,$$

wo unter dem Integral nur noch eine einfache Wellenform steht; C ist eine Konstante K und K' sind zur Abkürzung für $\frac{2\pi}{\lambda}$ bezw. $\frac{2\pi}{\tau}$ gesetzt, r_0 und r_1 sind die Abstände des Lichtpunktes und des Beobachtungspunktes von einem Punkt der Fläche S. Für die Summation dieser Einzelwellen kann geschrieben werden $\cos (K(r_0+r_1) - K't) = \cos K(r_0+r_1) \cos K't + \sin K(r_0+r_1) \sin K't$. Jede Welle ist dadurch in zwei Komponenten zerlegt mit den Einzelamplituden $A' = C \cos K(r_0+r_1)$ und $A'' = C \sin K(r_0+r_1)$ (vgl. die Behandlung der Fresnelschen Beugungserscheinungen nach Cornu). Die resultierende Gesamtintensität im Beobachtungspunkt wird dann gleich der Summe der Quadrate der Einzelamplituden $J = (\Sigma A')^2 + (\Sigma A'')^2 = C(c^2+s^2)$; wenn $c = \int \cos K(r_0 + r_1)\, ds$ und $s = \int \sin K(r_0+r_1)\, ds$ gesetzt wird. Für die Fraunhoferschen Beugungserscheinungen können wir noch die Blende als in einer Tangentialebene von S

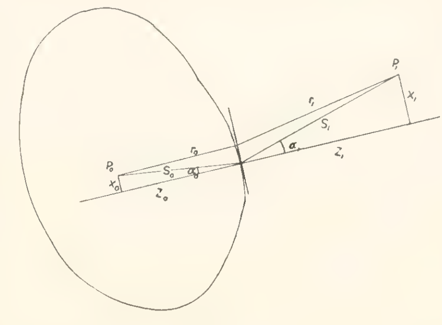


Fig. 16.

gelegen ansehen. Nehmen wir diese zur xy-Ebene, und bezeichnen mit ϱ_1 und ϱ_0 die Abstände zwischen P_1 und P_0 und dem Coordinatenanfange, so lassen sich durch elementare Umformungen, bei denen noch die Größen $\frac{1}{\varrho_1}$ und $\frac{1}{\varrho_0}$ wegen der Besonderheit der Fraunhoferschen Anordnung gleich Null gesetzt werden können, die Größen für c und s auf die Form bringen:

$$c = \int\int dxdy \cos K(x(\sin \alpha_1 - \sin \alpha_0) + y (\sin \beta_1 - \sin \beta_0))$$

$$s = \int\int dxdy \sin K (x (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_0) + y (\sin \beta_1 - \sin \beta_0))$$

hier ist gesetzt $\sin \alpha_1 = -\frac{x_1}{\varrho_1}$, $\sin \alpha_0 = \frac{x_0}{\varrho_0}$, $\sin \beta_1 = -\frac{y_1}{\varrho_1}$, $\sin \beta_0 = \frac{y_0}{\varrho_0}$ und x und y sind die Koordinaten der Punkte der Blendenöffnung. Durch die Auswertung dieser Integrale wird dann die Berechnung der Fraunhoferschen Beugungserscheinungen gewonnen, da die Intensität des Lichtes an den verschiedenen Stellen der Bildebene proportional $c^2 + s^2$ ist.

Zwei allgemeine Schlüsse lassen sich aus dieser Berechnungsweise der Fraunhoferschen Beugungserscheinungen ohne weiteres ziehen. Haben wir zunächst eine große Blendenöffnung von beliebiger Begrenzung, so groß, daß die Entstellung des Bildes des Lichtpunktes noch unmerklich gering ist, und bringen nun in der Mitte der Oeffnung einen kleinen Schirm an, dessen Gestalt ähnlich und ähnlich gelegen der großen Oeffnung ist, so mögen c' und s' die Werte der Integrale sein, wenn sie vom Rande des Schirmes bis zum Rande der großen Oeffnung erstreckt werden. c'' und s'' mögen dagegen die Werte sein, wenn die Integration nur über die Fläche des kleinen Schirmes erstreckt ist. Dann stellt $(c' + c'')^2 + (s' + s'')^2$ die Verteilung der Lichtintensität dar, wenn nur die große Oeffnung ohne das Schirmchen da ist. Da in diesem Falle aber außerhalb des Bildes des Lichtpunktes keine Helligkeit vorhanden sein soll, so muß dieser Ausdruck außer in diesem Bilde überall verschwinden; also muß $c' = -c''$ und $s' = -s''$ sein. Das heißt aber, die Beugungserscheinung eines kleinen Schirmes ist genau die gleiche wie die einer gleich gestalteten Oeffnung nur die Helligkeit in der Mitte des Feldes ist eine andere.

Haben wir ferner eine beliebige Zahl gleicher und ähnlich gelegener Oeffnungen, so mögen $a_1 b_1$, $a_2 b_2$, $a_3 b_3$, . . . die Koordinaten entsprechender Punkte in den verschiedenen Oeffnungen sein. Die sämtlichen Punkte aller Oeffnungen lassen sich dann durch Koordinaten der Form schreiben:

$$a_1 + x', \quad a_2 + x', \quad a_3 + x'$$
$$b_1 + y', \quad b_2 + y', \quad b_3 + y'$$

und wenn wir zur Abkürzung $K(\sin\alpha_1 - \sin\alpha_0) = p$ und $K(\sin\beta_1 - \sin\beta_0) = q$ setzen, so werden

$$c = \Sigma_i \iint dx'dy' \cos[p(a_i + x') + q(b_i + y')]$$

$$s = \Sigma_i \iint dx'dy' \sin[p(a_i + x') + q(b_i + y')]$$

Hier ist die Summation über die einzelnen Oeffnungen zu erstrecken. Durch Zerlegung der cosinus und sinus und geeignete Zusammenfassung erhält dann der Wert für die Lichtintensität die Form:

$$J = C(c^2 + s^2) = C(c'^2 + s'^2)(c''^2 + s'^2)$$ wo jetzt

$$c' = \iint dx'dy' \cos(px' + qy'); \quad c'' = \Sigma_i \cos(pa_i + qb_i)$$

$$s' = \iint dx'dy' \sin(px' + qy'); \quad s'' = 2 \sin(pa_i + qb_i)$$

ist. Das heißt aber: Die durch eine Anzahl gleicher Oeffnungen hervorgerufene Lichtverteilung ist gleich der durch eine einzige Oeffnung hervorgerufenen, nur ist die Intensität an jeder Stelle noch mit einem Faktor multipliziert, der allein durch die Zahl und Lage der Oeffnungen bestimmt ist. Ueber das einfache Beugungsbild lagert sich also noch ein Netz von Schatten über, durch das hindurch aber die Grunderscheinung noch deutlich hervortritt, wie das auch aus den Figuren 12, 13, 14 zu ersehen ist.

Aus den Berechnungen der Fraunhoferschen Beugungserscheinungen hat sich der Schluß ziehen lassen, daß eine große Zahl kleiner, gleicher Schirme in gleichmäßiger Verteilung als Grunderscheinung dasselbe Bild geben muß, wie eine einzelne kleine Oeffnung von der Gestalt der Schirme; daraus werden sofort eine Reihe weiterer Beugungsbilder verständlich. Blicken wir durch eine mit Bärlappsamen bestreute Glasplatte nach einer Lampe hin, so ist das Bild der Lampe mit schönen farbigen Ringen umgeben; jedes einzelne Körnchen auf der Platte stellt in diesem Falle einen kleinen kreisrunden Schirm dar. Die gleiche Erscheinung beobachten wir, wenn wir durch gleichmäßige feine Nebelmassen den Mond ansehen oder durch beschlagene Fenster nach den Straßenlaternen sehen. Ein anderes Bild haben wir, nämlich die Beugungserscheinung eines Spaltes, wenn wir mit fast geschlossenen Augenlidern zwischen den Wimpern hindurch nach einer Lampe blicken. Auf die gleiche Weise kommen auch die Farben bei der Reflexion von Flächen zustande, die mit einer sehr feinen Linienstruktur bedeckt sind, z. B. der Perlmutterglanz. In dies Gebiet gehört auch die Erscheinung die als „Asterismus“ bei Kristallen bezeichnet wird. Hier wird entweder durch regelmäßige Einlagerungen in einem Kristall oder durch Streifung der Kristalloberfläche oder durch Aetzfiguren eine Beugungswirkung hervorgerufen, so daß eine durch den Kristall hindurch gesehene Lichtquelle sternartig verzerrt erscheint.

Eine letzte Gruppe von Beugungserscheinungen erhalten wir, wenn die kleinen Teilchen, die das Licht abschirmen, so klein werden, daß ihre Größe mit der Wellenlänge des Lichtes vergleichbar oder noch kleiner wird. Es versagen dann die bisherigen Berechnungsweisen, aber wir können uns wohl vorstellen, daß bei Teilchen dieser Größenordnung die großen Wellen des roten Lichtes schließlich fast gar nicht mehr beeinflußt werden, während die viel kleineren blauen Wellen noch sehr starke Beugung erleiden. Daraus erklärt es sich, daß trübe Medien, in denen so kleine Teilchen gleichmäßig suspendiert sind, im durchscheinenden Lichte vorwiegend rote Töne zeigen, während sie bei seitlicher Beleuchtung vor dunklem Hintergrunde bläulich aussehen. Auf die Weise entsteht die bläuliche Farbe verdünnter Milch. Durch jedes durchscheinende Milchglas, Lampenglocke, sieht die Flamme einer Lampe mehr oder weniger rot aus. Sehr schön lassen sich diese Farben durch Wasser, dem einige Tropfen Mastixlösung zugesetzt wurde, sichtbar machen. Alle diese Erscheinungen werden auch mit dem Namen „Opaleszenz“ bezeichnet, nach dem Opal, an dem diese Farben eines trüber

Mediums sehr schön auftreten. Die Farben treten um so reiner als tiefes Rot oder dunkles Blau hervor, je kleiner und je gleichmäßiger die beugenden Partikel in der Substanz verteilt sind. Ueber die Erklärung des Abend- und Morgenrots und des Blaus des Himmels, die auch hiermit zusammenhängen, siehe den Artikel „Atmosphärische Optik".

Wenn man durch eine klare Substanz, z. B. eine kolloidale Lösung, einen feinen Lichtstrahl hindurchschickt, und dieser Strahl wird von der Seite gesehen als mehr oder weniger blauer Strahl sichtbar, so schließen wir stets, daß feine Teilchen in der Substanz suspendiert sind. Man hat dies seitwärts abgebeugte Licht in das Mikroskop eintreten lassen und so die einzelnen, die Beugung bewirkenden Teilchen sichtbar gemacht, wenn sie auch sonst so klein waren, daß sie weit unterhalb des direkten Wahrnehmungsvermögens des Mikroskops lagen (s. unter 5 „Auflösungsvermögen optischer Instrumente.... Mikroskop"). Diese Methode ist dann weiter in der „ultramikroskopischen" Beobachtungsweise durch Siedentopf und Zsigmondi nutzbar gemacht, um Aufschlüsse über die Zahl und auch bis zu gewissem Grade über die Größe der suspendierten Teilchen zu erhalten (vgl. die Artikel „Optische Instrumente" und „Mikroskopische Technik").

4. Gitter, Gitterspektra, Stufengitter. Eine Fraunhofersche Beugungserscheinung ist von besonders großer praktischer Bedeutung geworden, es ist dies die Erscheinung, die durch eine große Zahl paralleler, schmaler Spalten, ein sogenanntes Gitter, entsteht. Ueber die Verteilung der Lichtmaxima und Minima bei dieser Anordnung gewinnen wir leicht in elementarer Weise eine Uebersicht durch folgende Ueberlegung. In Figur 17 sei das Gitter im Querschnitt gezeichnet, e sei der Abstand homologer Punkte benachbarter Spalte, α_0 sei die Einfallsrichtung der Lichtstrahlen und α_1 sei die Richtung des gebeugten Lichtes, für welche die Helligkeit bestimmt werden soll. Der Gangunterschied der Strahlen auf der Seite, wo beobachtet wird, setzt sich dann aus den Einzeldifferenzen δ_0 und δ_1 zusammen. (Siehe Fig. 17.) Nun ist $\delta_0 = e \sin \alpha_0$ und $\delta_1 = e \sin \alpha_1$; der gesamte Gangunterschied ist also $\delta_1 - \delta_0 = e (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_0)$. Es tritt dann in den Richtungen ein Lichtmaximum auf, wo diese Gangdifferenz ein ganzes Vielfaches einer Wellenlänge ist, wo also $e (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_0) = m\lambda$ ist, wo m eine ganze Zahl ist, denn in diesen Richtungen summieren sich die von den einzelnen Spalten herkommenden Lichtwellen. Ist die Differenz $\delta_1 - \delta_0$ aber ein ungerades Vielfaches einer halben Wellenlänge, so löschen sich die aus benachbarten Spalten kommenden Lichtwellen paarweise durch Interferenz gerade aus; hier muß also Dunkelheit herrschen. Die Erscheinung wird also ein System paralleler heller Streifen sein, deren Lage durch die Gleichung $\sin \alpha_1 = \frac{m\lambda}{e} + \sin \alpha_0$ bestimmt ist. Meist wählt man die Einfallsrichtung senkrecht zur Gitterfläche, also $\sin \alpha_0 = 0$, dann liegen die Lichtmaxima in den Richtungen $\sin \alpha_1 = \frac{m\lambda}{e}$. Aus dieser Gleichung läßt sich sehr genau die Wellenlänge λ bestimmen, wenn man e und α_1 mißt, denn wenn man nur eine recht große Zahl

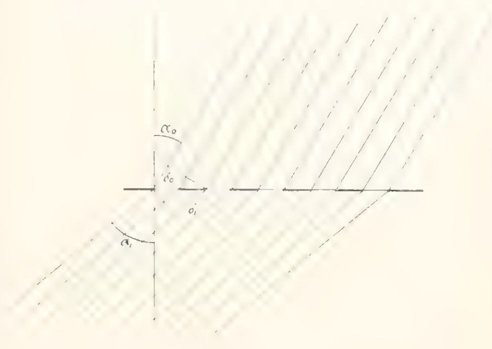


Fig. 17.

von Spalten nimmt, so werden in diesem Falle die Lichtmaxima außerordemtlich scharfe helle Linien, die durch fast ganz dunkle Zwischenräume getrennt sind. In der großen Bildschärfe, die sich mit solchen Gittern erreichen läßt, liegt überhaupt die besondere Bedeutung dieser Gittererscheinungen.

Für die genaue Berechnung der Lichtverteilung in diesem Falle brauchen wir nur zurückzugehen auf den oben gegebenen Satz über die Helligkeiten bei einer Reihe gleicher Oeffnungen. Wir erhielten dort die Intensität $J = C (c'^2 + s'^2)(c''^2 + s''^2)$, wo die c' und s' nur von der Form einer einzigen Oeffnung abhängen und c'', s'' allein von der Lage der Oeffnungen. Es war $c'' = \sum_i \cos (pa_i + qb_i)$, $s'' = \sum_i \sin (pa_i + qb_i)$. Hier war $p = \frac{2\pi}{\lambda} (\sin \alpha_1 - \sin \alpha_0)$ gesetzt. Legen wir die X-Achse senkrecht zur Spaltöffnung, so wird $q = 0$, $b_1 = b_2 = b_3 = 0$ und $a_1 = 0$; $a_2 = e$, $a_3 = 2e$, $a_4 = 3e$ usw. Es wird dann also

$$c'' = 1 + \cos pe + \cos 2pe + \ldots.$$
$$s'' = \sin pe + \sin 2pe + \sin 3pe + = ..$$

Diese Reihen können leicht summiert werden und es wird dann erhalten $c'' = \dfrac{\sin \frac{npe}{2} \cos \frac{(n-1)pe}{2}}{\sin \frac{pe}{2}}$

$$s'' = \frac{\sin\frac{npe}{2}\,\sin\frac{(n-1)pe}{2}}{\sin\frac{pe}{2}}$$ wo n die Zahl der Gitterstriche ist. Also wird $c''^2 + s''^2 = \left(\frac{\sin\frac{npe}{2}}{\sin\frac{pe}{2}}\right)^2$ und wenn man mit J' die von einer einzelnen Spalte herrührende Lichtverteilung bezeichnet, so bewirkt das Gitter die Lichtverteilung $J = n^2 J' \left(\frac{\sin\frac{npe}{2}}{n\sin\frac{pe}{2}}\right)^2$. Ist nun n eine große Zahl, so ist der Klammerausdruck meist sehr klein, denn der Zähler ist höchstens gleich Eins, während im Nenner die große Zahl n steht; es herrscht also an den meisten Stellen nur sehr geringe Lichtintensität, nur wenn $\frac{pe}{2} = \frac{\pi(\sin\alpha_1 - \sin\alpha_0)}{\lambda} e = m\pi$, gleich einem ganzen vielfachen von π wird, dann wird der Klammerausdruck sehr schnell gleich Eins. In diesen Richtungen tritt also plötzlich eine starke Lichtintensität auf, die gleich dem n^2 fachen von der ist, die eine einfache Spaltöffnung in dieser Richtung hervorrufen würde. Für senkrecht einfallendes Licht sind die Lagen der Lichtmaxima bestimmt durch die Beziehung $\sin\alpha_1 = \frac{m\lambda}{e}$, wie oben bereits elementar abgeleitet wurde. Für eine einfache Spaltöffnung von der Breite a hatten wir als Lage der Maxima gefunden $\sin\alpha = \frac{2n-1}{2}\frac{\lambda}{a}$ und für die Minima $\sin\alpha = \frac{n\lambda}{a}$, wo n jede ganze Zahl sein kann. Es folgt hieraus, wenn für denselben Winkel $\sin\alpha = \frac{m\lambda}{e} = \frac{n\lambda}{a}$ ist, daß dann das durch das Gitter geforderte Lichtmaximum gerade auf ein Minimum der Lichtverteilung durch einen einzelnen Spalt fällt; das heißt es muß ein Gittermaximum ausfallen, wenn $a : e = n : m$ ist. Sobald also zwischen der Spaltbreite und dem Abstande der einzelnen Spalten (der Gitterkonstante) ein einfaches Zahlenverhältnis besteht, so fallen gewisse Lichtmaxima fort. Sind z. B. die Spaltbreite und der zwischen den Spalten stehengebliebene Raum genau gleich groß, also $e = 2a$, so muß jedes zweite Beugungsbild des Gitters ausfallen. Diese Bedingung muß aber sehr genau erfüllt sein, denn sobald das Gittermaximum nicht genau auf die Stelle fällt, wo die Intensität J' genau gleich Null ist, so wird, weil J' mit dem Quadrat der meist sehr großen Anzahl der einzelnen Spalten zu multiplizieren ist, immer noch eine große Helligkeit entstehen. Immerhin erklärt sich aus diesen Verhältnissen, daß bei manchen Gittern die Beugungsbilder der verschiedenen Ordnungen recht verschieden hell ausfallen.

Derartige Gitter wurden zuerst von Fraunhofer hergestellt, indem er feine Drähte über die Windungen zweier sehr feingängiger parallel gelagerter Schrauben wickelte. Später führte man sie aus Glas aus, in das mit einem Diamanten sehr feine parallele Linien eingeritzt wurden. Die unverletzt stehengebliebenen Streifen des Glases stellen die Spalten dar. Das gleiche Verfahren in noch viel größerer Vollkommenheit wandte dann Rowland an, indem er polierte Flächen aus Spiegelmetall mit einem feinen Liniensystem bedeckte. Er erhielt so Reflexionsgitter, an denen das Beugungsbild an der Seite des reflektierten Lichtes beobachtet wird, wobei sonst die obigen Ableitungen unverändert gelten, nur daß der veränderten Richtung durch sinngemäßes Vorzeichen des Winkels α_1 Rechnung zu tragen ist. Die feinsten derartigen Gitter erhielten 1700 Linien auf der Breite eines Millimeters und die Gesamtzahl der ausgeführten Linien geht bis zu 110 000. Neuerdings ist die Herstellung dieser Gitter durch Ames mit dem noch weiter vervollkommneten Apparat wieder aufgenommen. Ebenso hat Michelson die Herstellung derartiger Gitter mit großem Erfolg in die Hand genommen. Von den Rowlandschen Gittern sind durch Thorp sehr gute Zelluloidabdrücke, die auf Glas aufgezogen sind, hergestellt, die wieder in durchfallendem Lichte zu benutzen sind. Leithäuser hat dann solche Thorpsche Gitter durch Kathodenzerstäubung platiniert und dadurch wieder Reflexionsgitter erhalten, die nun den Rowlandschen Originalgittern nur wenig nachstehen, aber erheblich billiger zu beschaffen sind.

Beobachtet man nun die Beugungserscheinung an einem solchen Gitter zunächst einmal mit einfarbigem roten Licht, so erhält man ein System scharfer roter Linien in der Art der oberen Reihe der Figur 18. Bei Verwendung von blauem Licht erhält man Streifen in den Abständen der unteren Reihe. Ist das einfallende Licht weiß, so wird es in den einzelnen Beugungsbildern

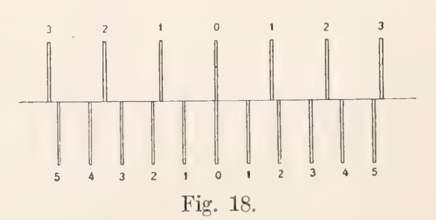


Fig. 18.

in ein farbiges Band, ein Spektrum, zerlegt, und zwar wird das erste Spektrum von der ersten blauen Linie beiderseits bis zur ersten roten Linie reichen. Wir sehen also die einzelnen Spektren kehren stets ihr blaues Ende der farblosen Mittellinie des ganzen Bildes zu, aber sie greifen schon vom zweiten Spektrum an übereinander,

indem das Blau des dritten Spektrums der Mitte schon näher liegt als das Rot des zweiten. Je höher die Ordnung der Spektren ist, desto weiter schieben sie sich ineinander, und das Verhältnis, in dem sie sich ineinanderschieben, ist an sich unabhängig von der Feinheit des Gitters oder der Ausdehnung (Dispersion) des einzelnen Spektrums.

Bei der außerordentlichen Vollkommenheit der Rowlandschen Gitter haben diese Beugungsspektra, die die Fraunhoferschen Linien (vgl. den Artikel „Spektroskopie") in außerordentlicher Schärfe zeigen, zum Studium aller Fragen der Spektralanalyse eine sehr große Bedeutung gewonnen. Zu beachten ist dabei, daß im Beugungsspektrum der Abstand benachbarter Spektrallinien stets proportional dem Unterschiede ihrer Wellenlänge ist, während dies bei durch Prismen gewonnenen Spektren durchaus nicht der Fall ist, da diese stets am blauen Ende des Spektrums eine wesentlich stärkere Dispersion zeigen. Ein Beugungsspektrum und ein Prismenspektrum von gleicher Gesamtlänge sind in Figur 19 mit

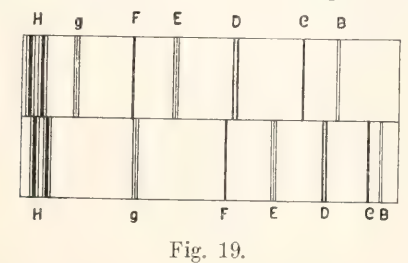


Fig. 19.

den wichtigsten Fraunhoferschen Linien übereinandergestellt schematisch gezeichnet. Das obere dieser Spektren, das Beugungsspektrum, wird auch das Normalspektrum genannt.

Man erhält übrigens nicht ohne weiteres bei jeder Benutzungsweise des Gitters ein genaues Normalspektrum, bei dem derselben Wellenlängendifferenz die gleiche Breite im Spektrum entspricht. Vielmehr folgt aus $\sin \alpha_1 - \sin \alpha_0 = \frac{e}{m\lambda}$ durch Differentiation $d\alpha_1 = \frac{m d\lambda}{e \cos \alpha_1}$. Gleichgültig also, welches die Einfallsrichtung α_0 des Lichtes ist, die Dispersion $d\alpha_1$ im Spektrum hängt stets vom $\cos \alpha_1$ ab. Bei großer Dispersion kann $\cos \alpha_1$ am einen Ende des Spektrums schon einen merklich anderen Wert haben als am anderen Ende. Nur wenn $\cos \alpha_1 = 1$ ist, also wenn in der Richtung senkrecht zur Gitterfläche beobachtet wird, wird $d\alpha_1$ wirklich proportional mit $d\lambda$. Bei photographischer Aufnahme ausgedehnter Teile des Spektrums ist es daher wichtig, stets diese Beobachtungsrichtung zu wählen, wenn man ein Spektrum erhalten will, in dem man durch Ausmessen der Abstände verschiedener Linien in einfacher Weise auf die Verhältnisse ihrer Wellenlängen schließen will. Die Richtung des einfallenden Lichtes muß dann gegen das Gitter geneigt sein. In allen anderen Beobachtungsrichtungen ist stets nur $d \sin \alpha$ proportional mit $d\lambda$.

Von großer Bedeutung ist die Verwendung von Gittern weiterhin dadurch geworden, daß es Rowland gelungen ist, die feinen Gitterlinien in gleicher Vollkommenheit in Hohlspiegelflächen einzuritzen. Die Wirkung des Hohlspiegels, der 2 bis 5 m Brennweite hat bei den Rowlandschen Gittern, macht dann die Verwendung des Fernrohrs und der Kollimatorlinse überflüssig und dadurch können auch Teile des Spektrums photographisch untersucht werden, die sonst in der Linsensubstanz absorbiert wurden. Hierdurch besonders sind erst die genauen Untersuchungen bis weit in das Ultraviolett hinein möglich geworden. Die Art, wie ein solches Konkavgitter zu verwenden ist, wird aus Figur 20 ersichtlich. Hier stellt AB

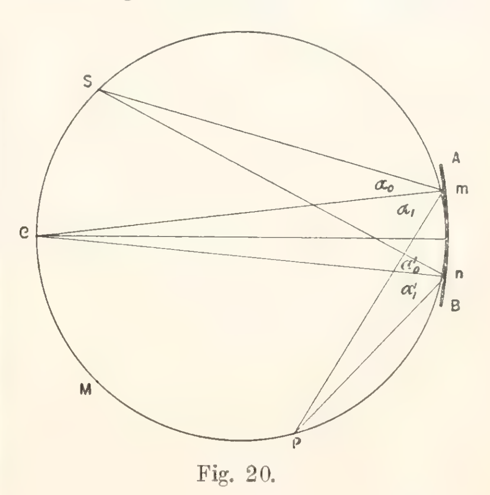


Fig. 20.

das Gitter dar, dessen Krümmungsmittelpunkt in C liegt. Um C und die Mitte des Gitters ist ein Kreis beschrieben. Wir denken uns dann das Konkavgitter aus lauter schmalen Plangittern bestehend, die auf der Kurve AB angeordnet sind. In S auf dem Kreise möge der Lichtspalt sein, und der Strahl Sm möge das kleine Plangitter in m treffen; dann ist $SmC = \sigma_0$ der Einfallswinkel und ein gebeugter Strahl möge in der Richtung α_1 nach P hin gerichtet sein. Dann ist $\sin \alpha_1 + \sin \sigma_0 = \frac{m\lambda}{e}$. Für ein anderes kleines Plangitter n erhalten wir entsprechend $\sin \alpha'_1 + \sin \alpha'_0 = \frac{m\lambda'}{e}$. Da nun aber AB den Kreis berührt und die Länge AB gegenüber dem großen Krümmungsradius nur sehr klein ist, so können wir als Peripheriewinkel über gleichen Bogen $\sigma_0 = \alpha'_0$ und

$\alpha_1 = \alpha'_1$ setzen. Dann muß aber auch $\lambda = \lambda'$ sein, das heißt aber die beiden Gitter m und n und ebenso alle anderen kleinen Plangitter, aus denen wir AB gebildet dachten, senden abgebeugte Strahlen von genau gleicher Wellenlänge nach P. An dieser Stelle entsteht also das Beugungsbild dieser Wellenlänge λ. Wir können also schließen, sämtliche Beugungsspektren liegen auf der Peripherie des durch C gelegten Kreises. Die farblose Mitte des ganzen Beugungsbildes liegt in dem Punkte M, der ebenso weit auf der anderen Seite von C entfernt liegt, wie S auf der einen. Auch im Punkte C selbst wird ein bestimmter Teil des ganzen Beugungsbildes liegen; welcher Teil dieses ist, hängt von der Lage von S auf dem Kreise ab. Für den in C liegenden Teil des Beugungsspektrums ist nun die Beobachtungsrichtung senkrecht zur Gitterfläche, an dieser Stelle ist also die oben abgeleitete Bedingung dafür erfüllt, daß das Spektrum ein möglichst genaues Normalspektrum ist, in dem die Abstände benachbarter Spektrallinien genau der Wellenlängendifferenz proportional sind. Für die photographische Aufnahme des Spektrums mit dem Konkavgitter wird man daher vorzugsweise die Aufstellung so wählen, daß die photographische Platte im Abstande des Krümmungsradius des Gitters in der Gitternormalen aufgestellt wird. Um dann die nötige Beweglichkeit zu erhalten, traf R o w l a n d die Anordnung, daß er zwei Balken AB und AC (Fig. 21) rechtwinkelig

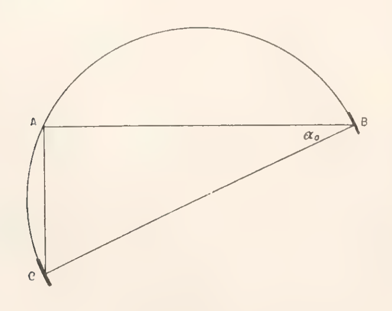


Fig. 21.

zueinander festlegte. Auf diesen Balken lief ein dritter Balken BC von der Länge des Krümmungsradius des Gitters mit an seinen Enden befestigten Rollen. Auf diesem Balken war in B das Gitter, dessen Normale nach C gerichtet war, und in C die photographische Platte angebracht. In A wurde der Lichtspalt aufgestellt. Durch Verschieben des Balkens BC gelangen die verschiedenen Teile der Spektren zur Abbildung in C. Bei dieser Anordnung ist $\sin\alpha_0$ proportional der Wellenlänge und da in diesem Falle AC dem $\sin\alpha_0$ entspricht, so kann auf dem Balken AC eine Teilung angebracht werden, die direkt abzulesen gestattet, welche Wellenlänge in der Mitte der photographischen Platte zur Abbildung gelangt.

Eine andere Aufstellung hat K a y s e r gewählt. Er läßt das Gitter und die photographische Platte in unverändert fester Stellung einander gegenübergestellt. Dann ist aber ein großer eiserner Halbring vorgesehen, dessen Enden unter dem Gitter und der Platte liegen und auf diesem wird die Spaltvorrichtung herumgeführt.

Unter Auflösungsvermögen eines Gitters versteht man die Fähigkeit zwei nahe beieinanderliegende Linien im Spektrum noch als zwei getrennte Linien abzubilden. Dasselbe ist einmal bestimmt durch die Größe der Dispersion, für die oben $\frac{d\alpha_1}{d\lambda} = \frac{m}{e\cos\alpha_1}$ gefunden wurde. Je kleiner die Gitterkonstante e, unter je schieferer Richtung gegen das Gitter beobachtet wird und je höher die Ordnung des benutzten Spektrums ist, desto mehr Linien sind noch voneinander zu trennen. Aber die Dispersion allein ist noch nicht maßgebend, sondern es kommt auch noch auf die Schärfe der einzelnen Linien an. Diese ist aus der oben abgeleiteten Formel

$$J = n^2 J' \left(\frac{\sin \frac{n\,pe}{2}}{n \sin \frac{pe}{2}} \right)^2$$

zu entnehmen, denn aus dieser folgt, daß der Klammerausdruck um so schneller von einem sehr kleinen Wert bis zum Werte Eins wächst, je größer n ist. Das Auflösungsvermögen eines Gitters ist also, bei sonst gleichen Werten von e, m und α, durch die Gesamtzahl n der vorhandenen Striche bestimmt. Man findet daher bei zwei Gittern von gleicher Gitterkonstanten e gleiches Auflösungsvermögen, wenn die Produkte aus Ordnungszahl m des Spektrums und Strichzahlen bei beiden einander gleich gewählt werden.

Während man die Leistungsfähigkeit der R o w l a n d schen Gitter dadurch auf das Höchste zu bringen versucht hat, daß man die gesamte Strichzahl möglichst groß machte, hat M i c h e l s o n einen ganz anderen Weg eingeschlagen, um Gitter von noch wesentlich größerem Auflösungsvermögen zu erhalten. Die Ordnungszahl m eines Gitterspektrums hängt ab von der in Wellenlängen gemessenen Wegdifferenz der aus zwei benachbarten Spalten austretenden Strahlen. Wenn man nun einen Spalt frei läßt und den benachbarten mit einer Glasplatte von der Dicke d bedeckt, so erhalten die senkrecht hindurchtretenden Strahlen bereits eine Wegdifferenz von $\frac{(n-1)d}{\lambda}$ (wo n den Brechungsindex des Glases bedeutet). Bedecken wir die einzelnen Gitterspalte der Reihe nach mit Glasdicken d, 2d, 3d, 4d, . . . so werden die senkrecht hindurchtretenden Strahlen be-

reits ein Spektrum von der Ordnung $\frac{(n-1)d}{\lambda}$ ergeben. Auf Grund dieser Ueberlegung hat Michelson sein Stufengitter konstruiert. Es besteht dieses aus einem System von Glasplatten von genau gleicher Dicke, die nach Figur 22 treppenartig so übereinandergeschichtet sind, daß jede höhere um das

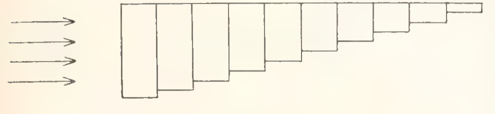


Fig. 22.

gleiche Stück gegenüber der unteren zurücktritt. Die Breite der Treppenstufen vertritt hier die Spalte des Gitters, da das ganze System in der Pfeilrichtung vom Lichte durchsetzt wird. Bei den Michelsonschen Stufengittern ist die Plattendicke 1 bis 2 cm und die Zahl der Platten 20 bis 30. Nimmt man den Brechungsindex zu 1,5 an und rechnet als Maß für das Auflösungsvermögen eines Gitters das Produkt aus Ordnungszahl und Gesamtzahl der Spalte, so hat ein Stufengitter von 30 Platten der Dicke 20 mm ein Auflösungsvermögen (bei $\lambda = 0{,}0005$) $\frac{20 . 0{,}5}{0{,}0005} . 30 =$ 600 000. Ein Rowlandsches Gitter mit 100 000 Strichen hat im Spektrum erster Ordnung erst den Wert 100 000 für das Auflösungsvermögen; in den höheren Ordnungen wird es entsprechend der Ordnungszahl größer, aber man kann über die 4. Ordnung meist nicht hinausgehen; da dann schon der Winkel α fast 90° wird, wird das Spektrum aber recht lichtschwach, während bei dem Stufengitter fast die gesamte Lichtmenge in der Richtung des gerade durchgehenden Lichtes zusammengehalten wird.

Der großen Dispersion und der großen Helligkeit der Stufengitter stehen aber zwei Nachteile derselben gegenüber. Wegen der sehr großen Ordnungszahl der beobachteten Spektren schieben sich mehrere Spektren benachbarter Ordnungen sehr dicht ineinander, so daß es oft schwer wird, die sichtbaren Linien den verschiedenen Ordnungen richtig zuzuordnen. Man muß daher meist aus dem einfallenden Licht durch vorangehende prismatische Zerlegung einen ganz schmalen Spektralbezirk aussondern. Der andere noch größere Nachteil ist der, daß seine Anwendung auf diejenigen Lichtstrahlen beschränkt ist, die durch den dicken Glasplattensatz noch nicht absorbiert werden.

5. Auflösungsvermögen optischer Instrumente. Fernrohr. Auge. Mikroskop (vgl. hierzu auch den Artikel „Abbildungslehre"). Wir sahen bereits, daß bei jeder optischen Abbildung eines lichtsendenden Punktes an Stelle des geometrischen Abbildes eine Fraunhofersche Beugungserscheinung entsteht, sobald das abbildende Strahlenbündel eine Begrenzung erleidet. Solche Begrenzung entsteht aber stets schon durch die Fassung der Linsen. In jedem Fernrohr entsteht daher an Stelle jedes Bildpunktes in Wahrheit ein, wenn auch nur sehr kleines, kreisrundes Beugungsscheibchen mit einigen hellen und dunklen Ringen. Die Größe dieser Beugungsfigur ist natürlich für die erreichbare Schärfe des Gesamtbildes von größter Bedeutung; um sie zu berechnen, muß man die Integration in der allgemeinen Formel für die Fraunhoferschen Beugungserscheinungen, wie sie oben angedeutet wurde, für eine kreisrunde Oeffnung ausführen. Die Rechnung bietet nichts prinzipiell Neues, daher genügt es das Ergebnis zu wissen. Ist δ der Abstand einer Stelle des Beugungsbildes von seiner Mitte, A der Abstand der Bildmitte von dem Fernrohrobjektiv (bei Einstellung auf sehr ferne Gegenstände ist A also gleich der Brennweite des Objektivs) und R der Radius der Objektivfassung, so möge der Ausdruck $\frac{2\pi R}{\lambda} . \frac{\delta}{A} = Z$ gesetzt werden. Die Helligkeit an einer Stelle des Bildes ist dann proportional dem Quadrate des Wertes der Reihe

$$M = \frac{1}{2} - \frac{Z^2}{2.4} + \frac{Z^4}{(2.4)^2.6} - \frac{Z^6}{(2.4.6)^2.8} + \cdots$$

In untenstehender Tabelle ist eine Reihe von Werten von Z mit den entsprechenden M^2 zusammengestellt, wobei der Wert von M für Z = 0 als Einheit genommen ist.

Z =	0	1,6	1,7	3,2	3,3	3,4	3,832
M^2 =	1	0,507	0,462	0,027	0,018	0,011	0
							Minimum

5,136	7,016	8,417	10,173
0.018	0	0,004	0
Maximum	Minimum	Maximum	Minimum

Der erste dunkle Ring, der zugleich die Grenze des inneren Beugungsscheibchens ist, hat also einen Durchmesser, der dem Werte 3,832 von Z entspricht, also $2\delta = \frac{\lambda A}{\pi R} . 3{,}832 = \frac{1{,}220 . \lambda A}{R}$, und in gleicher Weise können wir die Durchmesser der anderen Ringe aus obiger Tabelle entnehmen.

Für das Auflösungsvermögen eines Fernrohrs ist nun der Sehwinkel maßgebend, bis auf den zwei leuchtende Punkte, z. B. ein Doppelstern, zusammenrücken dürfen, um noch gerade als zwei getrennte Objekte wahrgenommen zu werden. Die beiden Beugungsscheibchen, die den Bildern der Sterne entsprechen, rücken dabei teilweise übereinander. Wir werden das entstehende Bild

so lange noch als das Bild zweier getrennter Punkte ansprechen, solange die Helligkeit zwischen den beiden Beugungsscheibchen noch merkbar dunkler ist als in den Mitten der einzelnen Beugungsscheibchen. Nun können wir Helligkeitsunterschiede noch deutlich erkennen, wenn sie 5 % betragen; unter Benutzung der obenstehenden Tabelle finden wir daher, daß für einen Abstand der Mitten der beiden Beugungsscheibchen, der einem Werte von $Z = 3,3$ entspricht, die Scheibchen sich so weit überdecken, daß in ihren beiden Zentren eine Gesamthelligkeit von 1,018 herrscht. In der Mitte zwischen ihnen herrscht aber noch die doppelte Helligkeit, die in jedem Scheibchen dem Werte $Z = 1,65$ entspricht. Hier ist also die Helligkeit noch 0,97, also gerade noch merklich geringer als in den Einzelzentren. Diesem Werte Z entspricht aber der Wert des Sehwinkels $\frac{\delta}{A} = \frac{\lambda}{2\pi R} . 3,3 = \frac{1,050 . \lambda}{2R}$. Sollen durch das Objektiv also noch Winkelsekunden getrennt werden können, so muß $\frac{\delta}{A} = \text{arc} 1'' = 0,00000485$ sein. Für die Wellenlänge des für unser Auge hellsten Lichtes $\lambda = 0,00055$ berechnet sich hieraus der Durchmesser des Objektives $2R = 120$ mm. Wir sehen aus diesem Beispiel, warum bei gesteigerten Anforderungen an das Auflösungsvermögen der astronomischen Fernrohre notwendig die Durchmesser der Objektivlinsen immer größer gewählt werden müssen. Die Grenze der Leistungsfähigkeit der Fernrohre ist daher dadurch bedingt, daß die Schwierigkeit der Herstellung der großen Glasscheiben immer größer wird und daß schließlich diese großen Scheiben durch ihr eigenes Gewicht in den verschiedenen Lagen sich verschieden durchbiegen. Man hat daher schon den Versuch gemacht, das Fernrohr selbst dauernd horizontal zu lagern, und die verschiedenen Sehrichtungen dadurch zu erhalten, daß vor dem Objektiv ein drehbarer, massiver, ebener Metallspiegel aufgestellt wurde, doch ist ein sicherer Erfolg auf diesem Wege bisher noch nicht erzielt worden. Ebenso beruht die Rückkehr zur Konstruktion großer Spiegelteleskope, bei denen die großen Spiegel gegen Durchbiegung gestützt werden können, zum Teil auf solchen Ueberlegungen.

Die gleiche Rechnung läßt sich auch auf photographische Objektive anwenden. Sollen bei diesen zwei Punkte im Bilde, die um 0,1 mm voneinander abstehen, noch getrennt erscheinen, so muß $\delta = 0,1 = \frac{1,050\,\lambda}{2R} A$ sein. Mit dem Werte von $\frac{2R}{A} = \frac{\text{Objektivöffnung}}{\text{Brennweite}}$ pflegt man die Helligkeit des Objektivs zu kennzeichnen und wir sehen, daß diese nicht unter $10,5 . \lambda$ also etwa 1:200 herabgesetzt werden darf, ohne durch Lichtbeugung wieder eine Verminderung der Schärfe zu bewirken.

Auch unser Auge ist als optisches Instrument aufzufassen, auf das diese Rechnung Anwendung findet. Der Durchmesser der Pupille ist bei mittlerer Helligkeit etwa 4 mm; also $2R = 4$. Der Winkelabstand, unter welchem wir hiernach aus Gründen der Lichtbeugung noch feine Strukturen trennen können sollten, wäre $\frac{\delta}{A} = \frac{1,05 . 0,00050}{4} = 0,5$ Minuten. Tatsächlich wird die Sehschärfe aber in der Regel nur zu etwa einer Minute gefunden, aus Gründen, die wahrscheinlich in optischen Unvollkommenheiten des Auges selbst liegen. Es ergibt sich dann aber weiter, daß die Sehschärfe des Auges noch nicht abnimmt, wenn wir die Pupille bis auf 2 mm abblenden. Halten wir aber eine Blende vor das Auge die kleiner als 2 mm im Durchmesser ist, so werden feine Strukturen, die wir vorher noch gerade erkennen konnten, durch Vorhalten der Blende undeutlich. Beobachten wir durch ein Fernrohr oder ein Mikroskop, so muß die ganze zur Wirkung gelangende Lichtmenge durch den vor dem Okular sichtbaren Okularkreis (vgl. den Artikel „Optische Instrumente") hindurchtreten; dieser Okularkreis wirkt also wie eine Blende und sollte nach dem Vorhergehenden nicht weniger als 2 mm im Durchmesser betragen. Wenn in der Praxis doch oftmals schärfere Okulare mit kleinerem Okularkreis Verwendung finden, so rechtfertigt sich dies dadurch, daß vielfach die Lichtverteilung infolge der nie ganz vollkommenen Korrektion der Linsen nicht der unseren Rechnungen zugrunde liegenden gleichmäßigen Verteilung in der Ebene des Okularkreises entspricht, und daß deswegen eine Verkleinerung des Okularkreises unter Umständen doch noch nutzbringend sein kann.

Anders liegen die Verhältnisse bei der Bilderzeugung im Mikroskop, denn hier gehen die Lichtstrahlen, der wir die Helligkeit im Bilde verdanken, nicht von dem mikroskopischen Präparat aus, sondern wir haben stets eine fremde Lichtquelle, die ihre Strahlen durch das Präparat hindurchsendet. Die Strahlen, die von derselben Stelle des Präparates herkommen und in verschiedenen Richtungen das Objektiv durchsetzen, stammen von verschiedenen Stellen der lichtgebenden Fläche her und sind daher nicht kohärent; sie können daher auch nicht zu irgendeiner Beugungswirkung sich vereinigen. Wohl aber wird eine Beugungserscheinung zu erwarten sein an jedem einzelnen von demselben Punkte der Leuchtfläche herstammen-

den Lichtbündel, das die ganze Fläche des Präparats durchsetzt. Es seien in Figur 23 H_1 und H_2 die Hauptebenen (vgl. den Artikel „Linsensysteme") des Objektivs, L ein Punkt der lichtgebenden Fläche, P ein Punkt des mikroskopischen Objekts O, und B das Bild von O, P′ das Bild von P. Der Strahl LPP′ ist dann nicht der einzige Weg, auf dem Licht von L nach P′ gelangt, sondern das mikroskopische Objekt wirkt selbst wie eine Blende mit vielen Oeffnungen. Nehmen wir an, das Objekt sei ein System feiner, paralleler Linien, dann wird das von L kommende Licht an diesem Liniensystem Beugung erleiden und es wird von P aus in einer Menge verschiedener Richtungen sich ausbreiten und das Objektiv durchsetzen.

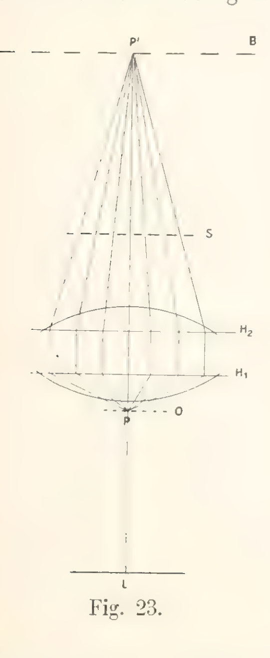


Fig. 23.

Also auch, wenn wir nur einen leuchtenden Punkt L annehmen, so geht doch von P ein Lichtfächer von gewisser Breite aus und wird durch die Strahlenbrechung in P′ wieder vereinigt. Wäre dieser Strahlenfächer gleichmäßig von Licht erfüllt, so müßte durch ihn in P′ die durch die Objektivfassung bedingte Fraunhofersche Beugungserscheinung wie beim Fernrohr entstehen; das heißt ein Punkt müßte als Scheibchen mit Beugungsringen, eine Linie als Streifen von gewisser Breite mit daneben liegenden hellen und dunklen Streifen erscheinen. In Wirklichkeit können wir aber in diesem Falle feststellen, daß der von P sich ausbreitende Lichtkegel nicht homogen ist. In der Ebene S, die dem Bilde der Leuchtfläche L entspricht, muß die Fraunhofersche Beugungserscheinung entstehen, die an die Stelle des Bildes von L infolge der dazwischen geschobenen Blende O tritt. Ist O ein Liniensystem, so wissen wir, daß in S bei einfarbigem Licht eine Reihe heller, scharfer Linien auf dunklem Grunde entsteht. Um die Lichtverteilung in der Bildebene B zu ermitteln, dürfen wir also nicht wie beim Fernrohr von der Helligkeitsverteilung in der Fläche des Objektivs ausgehen, sondern wir müssen von der uns genau bekannten Helligkeitsverteilung in der Fläche S ausgehen. Auf diese Fläche ist das Huygenssche Prinzip anzuwenden und jeder Teil dieser Fläche ist mit der Helligkeit in Rechnung zu setzen, die in ihm infolge der durch das Präparat erzeugten Beugungswirkung entsteht. Diese Rechnung ist mathematisch ziemlich verwickelt, aber sie ist von Abbe vollständig durchgeführt und führt zu folgendem einfachen und ganz allgemeinen Resultat: Kommt die Beugungsfigur in S vollständig zustande, ohne daß ein Teil derselben von den Rändern des Objektivs abgeblendet wird, so ist die Lichtverteilung in B so, daß hier ein geometrisch ähnliches Bild von O entsteht, das dort liegt, wo es nach den Regeln der geometrischen Optik zu erwarten ist; die Lage dieses Bildes ist insbesondere von der Lage von L unabhängig, obwohl doch die Lage der Helligkeiten in S durch jede Verschiebung von L geändert wird. Man kann daher den Punkt L durch eine leuchtende Fläche ersetzen, ohne daß außer der größeren Helligkeit die Art des Bildes in B geändert wird. Wird jedoch ein Teil des Beugungsbildes in S abgeblendet, so kann das Bild in B nicht mehr vollkommen ähnlich mit O sein; es wird um so unähnlicher, je weiter die Abblendung erfolgt; es entsteht überhaupt kein Bild mehr, sondern an seine Stelle tritt eine gleichmäßige Helligkeit, wenn in S nur noch ein einziges der getrennten Lichtbündel, gleichgültig welches übrig geblieben ist.

Diese theoretisch abgeleiteten Sätze finden ihre volle Bestätigung durch den Versuch. Ist O ein feines Streifensystem, so entsteht in S eine Reihe von Spektren, sobald man als Lichtquelle einen zu den Streifen parallelen Spalt verwendet. Diese Spektren, die beiderseits um einen farblosen mittleren Streifen gelagert sind, kann man leicht sehen, wenn man nach Herausnahme des Okulars von oben in den Mikroskoptubus blickt. Legt man nun in die Ebene der Spektren eine Blende, durch die nur ein einziges Spektrum oder nur der farblose Mittelstreifen hindurchgelassen wird, so erblickt man nach Wiederaufsetzen des Okulars überhaupt kein Bild der Linien mehr. Ist die Blende so groß, daß zwei nebeneinanderliegende Spektren hindurchtreten können, so erscheint im Bilde ein System heller und dunkler gleich breiter Streifen, ähnlich aussehend wie Fresnelsche Interferenzstreifen, auch wenn das Objekt aus feinen hellen Linien besteht, die durch breite dunkle Zwischenräume getrennt sind. Das Bild ist also jetzt nur sehr angenähert dem Objekt ähnlich, die Aehnlichkeit wird aber sofort größer, sobald wir die Blende größer wählen und mehr Spektren gleichzeitig hindurchtreten lassen. Noch auffallender wird die Bestätigung der Theorie, wenn wir eine

Blende so ausschneiden, daß der farblose Mittelstreifen hindurchtreten kann, daß aber beiderseits das erste, dritte, fünfte Spektrum abgeblendet wird und nur das zweite und vierte hindurchtreten kann. Als Bild entsteht dann ein System von Linien, die aber doppelt so dicht aneinanderstehen als dem geometrischen Abbild von O entsprechen würde. Das war auch nach der Theorie zu erwarten, denn, legen wir an Stelle von O ein Präparat von doppelt so feinen Linien, so erzeugt dieses in S nur gerade an den Stellen Spektren, die schon durch die Blende freigelassen sind. Also dieses Präparat wird ohne weiteres ähnlich abgebildet, während das vorige infolge der Blende ganz falsch abgebildet wurde. Die entsprechenden Versuche sind auch mit verschiedenen gekreuzten Liniensystemen und entsprechend geformten Blenden ausgeführt, und haben stets die volle Bestätigung der Theorie ergeben.

Aus diesen Versuchen ist zu schließen, daß das Auflösungsvermögen eines Mikroskops dadurch bedingt ist, daß das Objektiv noch die ganze durch das Präparat bedingte Beugungserscheinung hindurchzulassen vermag. Soll ein feines Liniensystem wenigstens noch als ein System gleichmäßiger Streifen erscheinen, so müssen mindestens noch zwei Beugungsspektren, den Mittelstreifen mitgerechnet, gleichzeitig zustande kommen können. Hieraus ergibt sich folgende Berechnung des Auflösungsvermögens des Mikroskops. Ein Liniensystem wirkt als Gitter, und wir haben gesehen, daß bei einem solchen bei senkrecht einfallendem Licht der Winkel α zwischen dem gerade hindurchtretenden Licht und dem ersten Beugungsstreifen bestimmt ist durch $\sin\alpha = \frac{\lambda}{e}$, wo e der Linienabstand ist. Strahlen von dieser Winkelabweichung gegen den mittleren Strahl müssen also durch das Objektiv noch aufgenommen werden. Nun kann das Objektiv, dessen Front linse plan zu sein pflegt, höchstens einen Winkel von $\alpha = 90^0$ (in Wirklichkeit stets etwas kleiner) zulassen. Für $\sin\alpha = 1$ wird aber $e = \lambda$; der durch das Objektiv noch trennbare Linienabstand kann also jedenfalls nicht kleiner als die Wellenlänge des benutzten Lichtes sein. Als Wellenlänge kommt hier jene Wellenlänge in Betracht, die in dem Medium vor der vorderen Objektivlinse besteht; ist dies Luft, so hat man die gewöhnlichen Größen der Lichtwellenlängen zu rechnen. Man erhält aber kleinere Werte, wenn man zwischen Präparat und Objektiv eine Flüssigkeit, Wasser oder Oel, bringt (Immersionssysteme). Ist n der Brechungsindex für die Immersionsflüssigkeit, so hat man die Wellenlänge $\frac{\lambda}{n}$ zu rechnen. Bei Oelimmersion ist $n = 1{,}5$. Für sichtbares Licht $\lambda = 0{,}00055$ wird der kleinste im Mikroskop bei gerader Beleuchtung noch sichtbare Linienabstand daher $e = \frac{0{,}00055}{1{,}5} = 0{,}00037$. Diese Grenze kann man dadurch noch auf etwa die Hälfte bringen, daß man schiefe Beleuchtung anwendet, so daß der farblose Strahl das Objektiv am einen Rande durchsetzt und das erste Spektrum am entgegengesetzten. Dadurch kommt man etwa bis zu $e = 0{,}00018$. Eine weitere Steigerung des Auflösungsvermögens des Mikroskops läßt sich nur noch durch noch stärkere Immersionsflüssigkeit (Monobromnaphtalin $n = 1{,}66$) oder durch kürzere Lichtwellen erreichen. Im letzten Falle muß man zur Photographie greifen, dann aber kann man mit ultraviolettem Licht auch noch etwa auf die Hälfte der obigen Zahl, also auf $\frac{1}{10000}$ mm. Linienabstand herunterkommen.

6. Talbotsche Streifen. Als Talbotsche Streifen wird ein System von Streifen bezeichnet, die in einem Spektrum sichtbar werden, wenn man die Hälfte der Pupille des beobachtenden Auges mit einem dünnen Deckgläschen bedeckt. Das Spektrum kann dabei objektiv auf einem Schirm entworfen sein oder auch subjektiv in einem Spektroskop gesehen werden. Die Talbotschen Streifen können auch objektiv im Spektrum selbst hervorgerufen werden, wenn die Hälfte der Linse, die das Spektrum entwirft, mit einem Deckgläschen bedeckt wird. Die Erklärung dieser Erscheinung erscheint zunächst sehr einfach, indem man sie als einfache Interferenzerscheinung auffaßt. Ist nämlich die Hälfte einer Linse, Fernrohr- oder Augenlinse, mit einer Platte von der Dicke d und dem Brechungsindex n bedeckt, so wird eine Lichtlinie, leuchtender Spalt, durch einen Lichtkegel abgebildet, dessen beide Hälften eine Phasendifferenz gegeneinander haben; diese Phasendifferenz beträgt $\frac{d(n-1)}{\lambda}$ in Wellenlängen gemessen. Ist dieser Wert genau eine ganze Zahl, so sind beide Hälften gerade um eine ganze Zahl von Wellen gegeneinander verschoben, werden sich also durch Interferenz gerade verstärken; ist die Differenz aber um eine halbe Wellenlänge größer, so werden sie sich durch Interferenz gegenseitig aufheben. Ist das einfallende Licht nun weißes Licht, so müssen im Bilde alle Wellenlängen, für welche $\frac{d(n-1)}{\lambda} = \frac{2k+1}{2}$ ($k = 0, 1, 2, 3 \ldots$) ist, ausfallen und wenn man das Bild spektral zerlegt, müssen im Spektrum an diesen Stellen dunkle Linien liegen. In der Tat gibt diese Berechnung die Lage der dunklen Linien richtig wieder

und die Talbotschen Streifen werden dadurch ein bequemes Mittel, von einer bekannten Wellenlänge im Spektrum ausgehend die Wellenlängen irgendwelcher anderer Teile des Spektrums zu bestimmen, denn es ist $\lambda = \frac{2d(n-1)}{2k+1}$; hat man aus einer bekannten Wellenlänge den Wert von d(n—1) bestimmt, für k = 0, so erhält man durch Einsetzen der Werte 1, 2, 3, ... für k die Wellenlängen an den Stellen, wo die entsprechenden dunklen Linien im Spektrum liegen. Auf diese Weise ist z. B. wiederholt die Bestimmung der Dispersion von Prismen bis weit ins Ultrarot hinein ausgeführt worden.

Diese einfache Erklärung der Talbotschen Streifen ist aber doch noch ungenügend, obwohl sie die richtige Lage der Linien ergibt, denn für die Entstehung der Streifen muß noch die besondere Bedingung erfüllt sein, daß das Gläschen von der Seite her vor das Auge oder die Linse geschoben wird, auf der das violette Ende des Spektrums liegt. Wird es von der anderen Seite vorgeschoben, so entstehen gar keine Streifen. Um dies zu erklären, muß auf die Beugungserscheinung zurückgegriffen werden, die bei der Abbildung des Spaltes entsteht. Wir nehmen der Einfachheit wegen an, daß die Linse durch ein rechteckiges Fenster begrenzt sei, und denken uns dies Fenster parallel dem Spalt in zwei gleiche Teile geteilt. Das Beugungsbild, das dann durch das ganze Fenster von dem Spalte entsteht, können wir auffassen als die Beugungserscheinung zweier rechteckiger Oeffnungen von der halben Fensterbreite, die aber aneinanderstoßen. Nach dem Früheren ist dieses Beugungsbild aber gleich dem eines halben Fensters, über das die Beugungswirkung durch das Zusammenwirken der benachbarten Fenster übergelagert ist. In Figur 24 ist oben das Beugungsbild a des

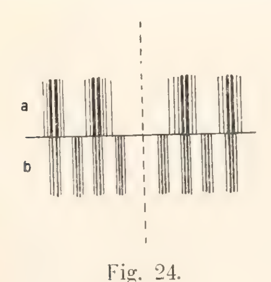


Fig. 24.

halben Fensters, und darunter das Streifensystem b, das aus dem Zusammenwirken beider Hälften resultiert und das sich dem oberen überlagert, dargestellt. Wird jetzt die rechte Hälfte mit einem Deckglas bedeckt, so werden dadurch die von dieser Hälfte herkommenden Strahlen in der Bildebene schon mehr Wellen zurückgelegt haben, da im Deckgläschen die Wellenlänge kürzer ist, infolgedessen muß das Streifensystem b nach links verschoben sein, während a unverändert bleibt. Ist nun die Wellenlängendifferenz gerade $\frac{2k+1}{2}\lambda$, so kommt die Uebereinanderlagerung der Figur 25 zustande, ist sie aber noch nicht ganz so viel, so erhalten wir Figur 26. Während bei Figur 25 gerade der hellste Teil in der Mitte bedeckt ist, also über-

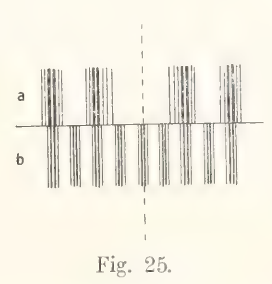


Fig. 25.

haupt nur noch sehr wenig sichtbar bleibt, ist bei Figur 26 noch ein etwas hellerer Streifen sichtbar, aber dieser erscheint etwas nach links gedrängt. Umgekehrt wird ein etwas nach rechts verschobener Streifen sichtbar, wenn die Wellenlängendifferenz etwas größer als $\frac{2k+1}{2}\lambda$ ist.

Denken wir uns nun das Spaltbild in ein Spektrum auseinandergezogen, so daß das rote Ende links, das blaue Ende rechts liegt und die rechte Fensterhälfte mit dem Gläs-

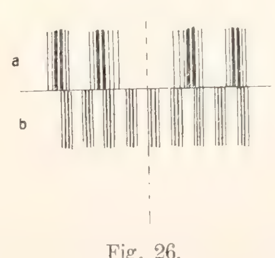


Fig. 26.

chen bedeckt. Jetzt betrachten wir eine Stelle im Rot, wo die Phasendifferenz aus beiden Hälften gleich kλ ist, wo also Helligkeit herrscht. Gehen wir von hier aus nach der Seite kürzerer Wellenlängen, so kommen wir erst in das Gebiet der Figur 26 und dann von Figur 25; das heißt in dem Gebiet vor dem zu erwartenden dunklen Streifen ist das Spaltbild etwas nach links verschoben und hinter denselben nach rechts. Offenbar erscheint

dadurch der dunkle Streifen breiter und deutlicher. Wäre dagegen die linke Fensterhälfte bedeckt worden, so wären die entsprechenden Bildverschiebungen so erfolgt, daß dadurch der dunkle Streifen gerade zugedeckt wird. Daher kommt es, daß beim Vorschieben des Deckgläschens vom roten Ende des Spektrums her die Talbot schen Streifen nicht sichtbar werden. Aus dieser Ableitung wird auch verständlich, daß für das Sichtbarwerden der Talbot schen Streifen ein gewisses Verhältnis zwischen der Dispersion des Spektrums und der Größe des Fensters und damit der Breite der Streifen im Beugungsbilde am günstigsten sein wird.

Literatur. ***Chwolson***, *Lehrbuch der Physik, Bd. 2, deutsch von Pflaum, Braunschweig 1904.* — ***Müller-Pouillet***, *Lehrbuch der Physik, 2. Aufl., Bd. 2, Optik von* ***Lummer***, *Braunschweig 1897* — ***Winkelmann***, *Handbuch der Physik, 2. Aufl., Bd. 6, Leipzig 1898.* — ***Wüllner***, *Experimentalphysik, 5. Aufl., Bd. 4, Leipzig 1899.* — ***Helmholtz***, *Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. 5, Leipzig 1897.* — ***Kirchhoff***, *Vorlesungen über theoretische Physik, Bd. 2, Leipzig 1891.* — ***Abbe***, *Die Lehre von der Bildentstehung im Mikroskop von* ***Lummer-Reiche***, *Braunschweig 1910.* — ***Classen***, *Mathematische Optik, Leipzig 1901.* — ***Cornu***, *Journal de Physique, Bd. 3, 1874, S. 5 u. 44.* — ***F. M. Schwerd***, *Die Beugungserscheinungen aus den Fundamentalsätzen der Undulationstheorie analytisch entwickelt, Mannheim 1835.*

J. Classen.

Lichtbogenentladung.

A. Lichtbogenentladung mit Gleichstrom.

A. 1. Beschreibung der Lichtbogenerscheinung. Verbindet man zwei leitende Stäbe (z. B. aus Kohle oder Metall) durch geeigneten Widerstand mit den Polen einer leistungsfähigen Batterie von wenigstens 50 Volt, bringt die Stabenden einen Augenblick in Berührung und zieht sie dann auseinander, so entsteht zwischen den Berührungsstellen die Lichtbogenentladung. Sie wurde wahrscheinlich 1808 zuerst von Davy mit Hilfe einer großen Voltaschen Säule erzeugt und beobachtet.

Die Lichtbogenentladung zwischen Kohlenstäben in freier Luft hat folgendes typische Aussehen: Die Enden, zwischen denen die Lichtbogenentladung übergeht, nehmen nach einiger Zeit charakteristische, im Einzelnen durch die Versuchsbedingungen mannigfach modifizierte Formen an (s. Fig. 1). Die positive Kohle stumpft sich ellipsoidisch ab; der rot bis gelb glühende Ellipsoidstumpf trägt die Ansatzstelle des Lichtbogens, den hellweißglühenden positiven Krater, aus dem violett leuchtende Kohledämpfe herausgeworfen werden. Die negative Kohle spitzt sich kerzenförmig zu, bei kleiner Bogenlänge bildet sich gelegentlich eine pilzförmige Spitze. Sie trägt an der in geringerem Maße glühenden Spitze ebenfalls einen, allerdings erheblich kleineren weißglühenden negativen Krater, dessen Dämpfe sich mit denen des positiven Kraters vereinigen. Die violett leuchtende, die beiden Krater verbindende Gassäule bildet offenbar den wesentlichen Teil der Strombahn. Sie ist — durch eine dunklere Region getrennt — von einer rötlich schwälenden Flamme umhüllt, der Aureole. Da diese nur vorhanden ist, wenn der Kohlenlichtbogen in Luft oder in sonstigen sauerstoffhaltigen Gasgemengen brennt, so schließt man, daß sie eine durch Verbrennungsvorgänge bestimmte sekundäre und unwesentliche Erscheinung ist.

Brennt der Kohlenlichtbogen in Wasserstoff oder in seinen eigenen Verbrennungsgasen, so beobachtet man bei genügend

kleiner Stromstärke (von etwa 0,6 Amp. abwärts) eine Lichtbogenentladung, bei der wohl ein negativer aber kein potitiver Krater ausgebildet ist. In diesem Falle



Fig. 1. Der Gleichstromlichtbogen zwischen Kohlenelektroden. Oben positiver, unten negativer Pol.

reicht die Verdampfung am negativen Krater nicht aus, den ganzen Bogen mit Elektrodengas zu erfüllen, und die Lichtbogenentladung vollzieht sich zum Teil in dem einhüllenden Gase.

Die Kohlenspitzen, zwischen denen der Lichtbogen brennt, werden mit der Zeit verzehrt, sie erfahren einen „Abbrand"; die positive brennt ungefähr 2 bis 2,5mal schneller ab wie die negative, doch hängt das sehr von den speziellen Versuchsbedingungen ab. Man wählt in der Praxis, um diesen Unterschied auszugleichen, als positive Kohle entsprechend dickere Stäbe. Der absolute Abbrand wächst natürlich mit der Stromstärke, er beträgt insgesamt rund 1 g Kohle pro Stunde und Amp. Der Abbrand ist zum allergrößten Teil durch die bei Gegenwart von Luft notwendig erfolgende Verbrennung der Kohlenspitzen bedingt. Läßt man die Lichtbogenentladung in indifferenten Gasen erfolgen, z. B. in den eigenen Verbrennungsgasen unter Luftabschluß, so wird der Abbrand 10 bis 20mal kleiner. Dann fällt auch das Stumpfbrennen der Kohlen fort, sie verzehren sich mit ziemlich scharf abgeschnittenen ebenen Flächen, indem der Lichtbogen stets die gerade am weitesten vorstehenden Kohlenenden ergreift und verzehrt. Ein solcher Lichtbogen brennt wegen dieses Hin- und Herwanderns unruhig.

Die Lichtbogenentladung zwischen Metallelektroden hat denselben Charakter, nur sind bei gleichen Stromstärken die Krater weniger groß und hell. Auch ist der Lichtbogen zwischen Metallelektroden in Luft im allgemeinen unruhig. Bei größeren Stromstärken ist er schwer zu unterhalten, da die Spitzen der Elektroden bald abschmelzen. In Gegenwart von Sauerstoff stört auch die Oxydbildung oft sehr. Zwischen Kupferelektroden im luftverdünnten Raum konnten Hagenbach und Veillon 6 Formen des Lichtbogens unterscheiden, die sich zum Teil durch wechselnde Oxydierungsverhältnisse erklären ließen. Geht man bei Anwendung hoher Spannungen von sehr kleinen Stromstärken aus, so erhält man bei Metallen zunächst eine Glimmstromentladung (siehe diese), bei einem Strom von der Größenordnung 0,5 Amp. springt dieselbe in die Lichtbogenentladung über, bei der nur ein negativer Krater vorhanden ist, während an der Anode der Charakter der Glimmstromentladung bestehen bleibt. Erst bei höherer Stromstärke bildet sich auch der positive Krater aus. Der Uebergang vom Glimmstrom zum Lichtbogen erfolgt bei um so höherer Stromstärke, je höher der Schmelzpunkt des Metalles liegt und je weniger oxydierbar das Metall ist. In Wasserstoff, wo die Oxydbildung ausgeschlossen ist, erfolgt deshalb die Bildung der Lichtbogenentladung schwer, und es gelingt z. B. bei Kupfer überhaupt kaum, sie herzustellen. Die Elektroden schmelzen vielmehr schon vorher ab.

Auch zwischen festen Leitern zweiter Klasse (Metalloxyde, Fluoride, Boride, Silicide usw.) erhält man einen Lichtbogen. So z. B. zwischen zwei Stückchen der porzellanartigen, aus seltenen Erden bestehenden Stiften der Nernstschen Glühlampen. Da sie erst bei hoher Temperatur zu Leitern werden, läßt sich der Lichtbogen erst bilden, wenn man die Stifte stark angeheitzt hat (E. Rasch). Der Strom hält sie danach auf der erforderlichen hohen Temperatur. Die Krater strahlen hier ein äußerst intensives weißes Licht aus.

Die Lichtbogenentladung zwischen Quecksilberelektroden im Vakuum, der Quecksilberlichtbogen wurde zuerst genauer von Arons (1899) untersucht. Eine Glas-

röhre mit zwei Elektrodenansätzen, in denen Platineinschmelzungen die Stromzufuhr zu den Quecksilberelektroden vermitteln, wird luftleer gepumpt. Der Bogen wird z. B. durch Ueberfließenlassen des Quecksilbers zwischen den Elektroden gezündet; nachdem er eine Zeitlang gebrannt hat, und alle Gase aus dem Quecksilber entwichen sind, wird die Lampe von der Luftpumpe abgeschmolzen. Der Quecksilberlichtbogen zeigt folgendes Aussehen (Fig. 2): Einem weißglühenden, auf dem Quecksilber hin und

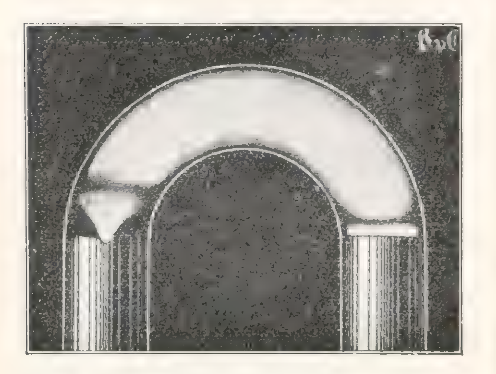


Fig. 2. Quecksilberlichtbogen. Aus Czudnochowski, Das elektrische Bogenlicht. Links negative, rechts positive Elektrode.

her wirbelnden negativen Krater entströmt ein pilzförmiges Büschel leuchtenden Quecksilberdampfes. Von ihm durch einen weniger leuchtenden kurzen Zwischenraum getrennt, erstreckt sich bis unmittelbar vor die Anode eine Säule leuchtenden Quecksilberdampfes, die positive Lichtsäule; die Anode ist auf der ganzen Fläche mit einer dünnen leuchtenden Schicht bedeckt. Uebrigens kann die Anode auch aus einem anderen Metall, z. B. aus Eisen bestehen. Die Verdampfung an dem negativen Krater erfolgt so lebhaft, daß der Rückstoß eine Vertiefung in die flüssige Oberfläche eindrückt. Besteht auch die Anode aus Quecksilber, so erfolgt an ihr eine Verdampfung, welche die an der Kathode erheblich übertrifft, so daß das Quecksilber allmählich von der Anode zur Kathode hinüber destilliert. Infolge der Verdampfung erhöht sich der innere Druck der Lampe bis zu einem Gleichgewichtszustand, bei dem die Kondensation an den Wänden der Verdampfung das Gleichgewicht hält. Damit dieser Gleichgewichtsdruck die Röhre nicht zersprengt, muß man die Lampe in Wasser kühlen oder die Kondensationsoberfläche genügend vergrößern (vgl. C 3c).

Die in neuerer Zeit von Heraeus eingeführten Quarzquecksilberlampen halten einen erheblich höheren inneren Druck aus, wie die Glaslampen und können darum mit relativ hohen Stromstärken brennen. Solche Lampen stellt man auch mit Füllungen von Quecksilberamalgamen her; auch mit Metallen, die erst durch den Lichtbogen flüssig werden, hat man sie gelegentlich betrieben.

Die Lichtbogenentladung läßt sich auch unter Flüssigkeiten erzeugen. Von einem Metalllichtbogen unter Wasser gehen die Metalle, wie Bredig zeigte, kolloidal in Lösung (vgl. den Artikel „Disperse Gebilde").

A 2. Die elektrischen Eigenschaften der Lichtbogenentladung. 2a) Die statische Charakteristik. Der Lichtbogen stellt einen gasförmigen Leiter des elektrischen Stromes dar. Seine Leitungseigenschaften übersieht man am besten an seiner Charakteristik, d. h. der mit Strom- und Spannungsmesser aufzunehmenden graphisch dargestellten Beziehung zwischen Klemmenspannung e und Stromstärke i. Figur 3

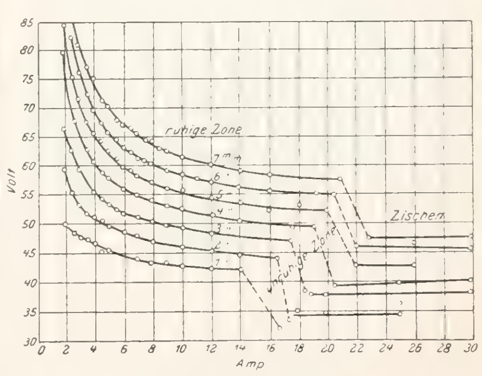


Fig. 3. Statische Charakteristiken eines Kohlenlichtbogens.

zeigt solche Kurven (nach Frau Ayrton) für den Lichtbogen zwischen Kohlenelektroden in Luft bei verschiedenen Bogenlängen. Figur 4 (nach Malcolm) für einige Metalle in Luft bei 4 mm Elektrodenabstand.

Aehnliche Kurven werden in allen Fällen erhalten, wo die Lichtbogenentladung bei gleichbleibendem Gasdruck übergeht. Indessen gibt es auch Fälle, wo die Charakteristik bei höheren Stromwerten wieder langsam ansteigt.

Jede dieser Kurven läßt sich, wie Frau Ayrton für Kohle zeigte, andere Forscher für Metalle und Elektrolyte bestätigten, durch eine Gleichung

$$e = \frac{a}{i} + b \text{ ....1)}$$

darstellen. Dabei hängt a sowohl wie b von der Bogenlänge l ab, indem

$$a = \alpha + \beta l \;\ldots\ldots\ldots\ldots 2)$$

$$b = \gamma + \delta l \;\ldots\ldots\ldots\ldots 3)$$

Danach setzt sich der Spannungsabfall im Lichtbogen aus einem von der Strom-

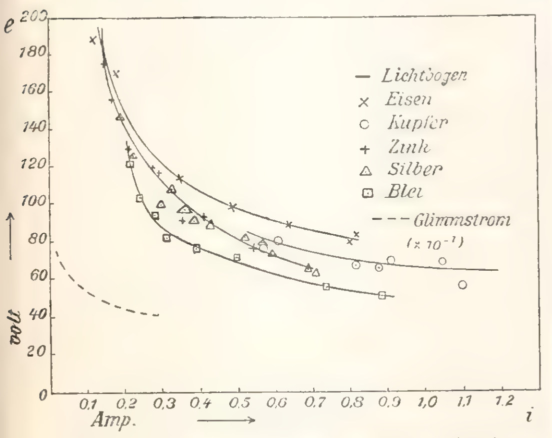


Fig. 4. Charakteristiken von Metallichtbogen.

stärke unabhängigen Anteil b zusammen, und einem von der Stromstärke abhängigen Teil $\frac{a}{i}$. Die Bedeutung der Konstanten α, β, γ, δ wird aus folgenden Ueberlegungen klar:

Gleichung 1) ist die Gleichung einer Schar von ungleichseitigen Hyperbeln, deren Asymptoten die e-Achse und eine zu i-Achse im Abstande b gezogene Parallele sind (siehe Fig. 5).

Mit abnehmender Stromstärke strebt die Klemmenspannung auf ∞ zu wachsen. Indes gilt die Gleichung 1) nur bis zu einer gewissen Stromstärke herunter. Unterhalb derselben, in dem sogenannten „Zündungsgebiete" der Lichtbogenentladung gelten besondere Gesetze.

Fig. 5.

Mit wachsendem Strome andererseits strebt die Klemmenspannung dem konstanten Grenzwerte b zu. Zur Unterhaltung des Lichtbogens ist also wenigstens eine Spannung von b Volt nötig, b ist die sogenannte Minimalspannung. Figur 6 zeigt graphisch die durch Gleichung 3) ausgedrückte Abhängigkeit der Minimalspannung von der Bogenlänge. Man sieht, daß γ der Grenzwert ist, dem die Minimalspannung b bei der Lichtbogenlänge 0 zustrebt. Man nennt die Minimalspannung b wohl auch die gegenelektromotorische Kraft des Licht-

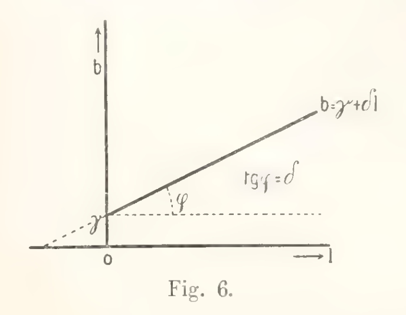


Fig. 6.

bogens. Die Konstante $a = \alpha + \beta l$ (Fig. 7) bestimmt den speziellen Verlauf der Charakteristiken. Je kleiner a, desto enger schmiegt sich die Hyperbel in den Winkel ihrer beiden Asymptoten; je kleiner a, desto schneller fällt also die Charakteristik mit wachsendem Strome auf den Wert b der Minimalspannung.

Fig. 7.

α, der Wert, den a für $l = 0$ hat, bestimmt dabei eine Grenzhyperbel engster Einschmiegung, die zu der Asymptote γ gehört.

Neuere Autoren meinen, daß $\alpha = 0$ gesetzt werden müsse, daß also bei $l = 0$ die Hyperbel mit den Asymptoten selbst zusammenfalle. Wenn Frau Ayrton für diese Konstante einen von 0 abweichenden Wert findet, so soll das durch ihre Methode der Bogenlängenbestimmung begründet sein. Sie mißt nämlich den Abstand der Kathodenspitze von der Randebene des positiven Kraters, während streng genommen dessen Tiefe als Bogenlänge mitgerechnet werden muß.

Multipliziert man Gleichung 1) mit i, so ergibt sich

$$ei = a + bi \;\ldots\ldots\ldots 4)$$

Diese Gleichung besagt: die im Lichtbogen verbrauchte elektrische Leistung ei setzt sich aus einem konstanten Gliede a und einem der Stromstärke proportionalen Gliede bi zusammen. Figur 8 stellt Gleichung 4) graphisch dar. Der Wert a, dem die Leistung mit abnehmen-

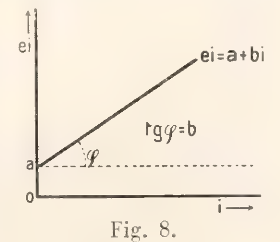


Fig. 8.

dem Strome zustrebt, zeigt, daß die Lichtbogenentladung nicht eintreten kann, ehe nicht ein Minimum a an Energieabgabe gesichert ist. Wenn a mit l Null wird ($\alpha = 0$, vgl. oben), so besteht bei direkter Berührung die Lichtbogenleistung lediglich in der Ueberwindung der gegenelektromotorischen Kraft b, die demnach unmittelbar an den Kratern ihren Sitz hätte. a dagegen ist der Anteil der Leistung, welcher auf den Lichtbogen selbst entfällt; $\frac{a}{i}$ daher der Spannungsabfall, den der Strom in den Lichtbogengasen erfährt. Nimmt man an, daß sich die gasförmige Strombahn wie ein Widerstand w verhält, so ist dieses w durch die Beziehung $iw = \frac{a}{i}$ bestimmt, d. h. $w = \frac{a}{i^2}$, der Widerstand der Strombahn muß dem Quadrate der Stromstärke umgekehrt proportional sein. Da allgemein $w = \frac{1}{\lambda}\frac{l}{q}$ ist (λ Leitfähigkeit des Gases, l Länge, q Querschnitt der Strombahn), so muß λq proportional i^2 sein. Nun hat man beobachtet, daß q nahezu i proportional ist, also muß auch λ proportional i sein: Die Leitfähigkeit der Lichtbogengase wächst ungefähr der Stromstärke proportional.

Eine Prüfung der Spannungsverteilung längs des Lichtbogens mit Hilfe von Sonden hat in der Tat ergeben, daß die GegenEMKb ihren Sitz an den Kratern hat und daß sie sich aus einem Kathodenfall e_K und einem Anodenfall e_A zusammensetzt, also

$$b = e_K + e_A \quad \ldots\ldots\ 5)$$

Das Spannungsgefälle in der Lichtbogensäule findet sich konstant, so daß die Verteilung der Spannung längs des Lichtbogens schematisch durch Figur 9 dargestellt werden

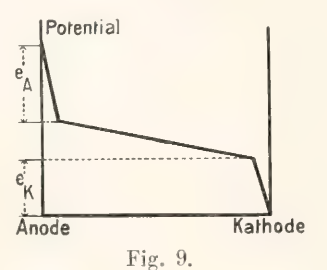


Fig. 9.

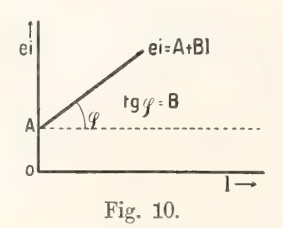


Fig. 10.

kann. Für eine Lichtbogenentladung von der konstant gehaltenen Stromstärke i', deren Bogenlänge man variiert, ergibt Gleichung 4

$$ei' = \alpha + \beta l + (\gamma + \delta l)\, i' = \alpha + \gamma i' + (\beta + \delta i')l = A + Bl \quad \ldots\ldots\ 6)$$

(siehe Fig. 10). Die Leistung A, die bei der Bogenlänge 0 aufgewendet werden muß, deutet wieder darauf hin, daß die Lichtbogenentladung erst eintreten kann, nachdem ein Minimum von Energieaufwand gesichert ist.

Die Werte der Konstanten α, β, γ, δ sind für die Lichtbogenentladung in freier Luft wie folgt gefunden worden:

Elektrodenmaterial	Beobachter	α	β	γ	δ	Bemerkungen
Kohle	Ayrton	10,54	11,66	38,88	2,074	Homogenkohlen. positiv 11 mm, negativ 9 mm Dm.
Silber	C. E. Guye und L. Zebrikoff. (1907)	19.01	11,36	14,19	3,64	Zwischen 2—18 Amp. Stromstärke 0—4 mm Bogenlänge, 16 mm Elektrodendurchmesser.
Eisen		15,02	9,44	15,73	2,52	
Nickel		17,48	—	17,14	3,89	
Kobalt		10,12	2,07	20,78	2,05	
Gold		20,97	12,17	20,82	4,62	
Kupfer		15,24	10,69	21,38	3,03	
Palladium		21,78	—	21,64	3,70	
Platin		20,33	—	24,20	4,80	

Indessen ist diesen Zahlen keine allzu große Bedeutung beizumessen, denn die Unsicherheiten der Messungen sind erheblich; auch beeinflussen Zufälligkeiten die Ergebnisse sehr. Jedenfalls sprechen neuere, noch nicht publizierte Messungen dafür, daß bei Metallen die Konstante $a = \alpha + \beta l$ sehr klein ist, so daß als Charakteristik der in Figur 11 durch die ausgezogene Kurve dargestellte Typus angenommen werden darf. Von der Zündspannung (vgl. unten 2c) stürzt sie in steilem Fall auf den Wert b herunter, der dann für alle Stromstärken konstant bleibt. Daraus ist zu schließen, daß die Metalldämpfe im Lichtbogen einen verschwindend kleinen

Widerstand haben. Das zeigt sich auch darin, daß Zusätze von Metalldämpfen und metalloidalen Gasen das Spannungsgefälle des Kohlenlichtbogens stark herunter setzen; während andererseits Beimengungen von nichtmetalloidalen Gasen das Spannungsgefälle der metallischen Lichtbogenentladung erhöhen. Je kleiner der Anteil am Metalldampf ist, desto größer ist das Spannungs-

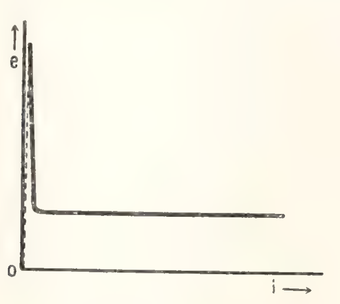


Fig. 11.

gefälle. Darum steigt mit abnehmender Stromstärke, also abnehmender Verdampfung der Elektroden, der Potentialfall so schnell. In einem Lichtbogen zwischen Kohle oder Platin und Quecksilber ist das Gefälle kleiner, wenn das Quecksilber die Anode, als wenn es Kathode ist. Aus diesem Grunde hängt die Intensität des Funkens bei einem Quecksilberunterbrecher von der Stromrichtung ab.

Zahlenmäßig ist für das Spannungsgefälle der Lichtbogensäule, bezogen auf gleiche Stromstärke, gefunden:

Für Kohlenelektroden in Wasserdampf 266 Volt/cm
Für Kohlenelektroden in Kohlensäure 100 Volt/cm
Für Kupferelektroden in Wasserdampf 60 Volt/cm

Durch die genannten Einflüsse auf die Leitfähigkeit der Elektrodendämpfe erklärt sich auch, wenigstens zum Teil, der Einfluß, den das umgebende Gas auf die Charakteristik der Lichtbogenentladung ausübt. Figur 12 zeigt denselben für einen Kohlenlichtbogen, der in verschiedene Gase eingebettet wurde. Figur 13 entsprechend für einen Silberlichtbogen. Bei Luft und Stickstoff spielen indessen überwiegend sekundäre chemische Prozesse mit, die sich zwischen ihnen und den weißglühenden Kraterenden abspielen. Auf Anoden- und Kathodenfall soll im übrigen die Natur des umgebenden Gases wenig Einfluß haben, solange chemische Wechselwirkungen der genannten Art ausgeschlossen bleiben. Bei Kupferelektroden ist die Minimalspannung $b = e_A + e_K$ erheblich höher als für Kohle.

Die Größe des Anoden- und Kathodenfalles hängt sehr von den speziellen Versuchsbedingungen ab. Beim normalen Kohlenbogen in Luft ist der Anodenfall größer als der Kathodenfall (Anodenfall 10 bis 20 Volt, Kathodenfall 5 bis 15 Volt). Der Kathoden-

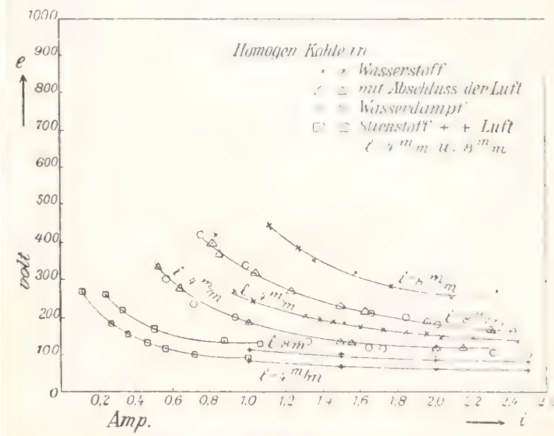


Fig. 12. Nach Ma co m.

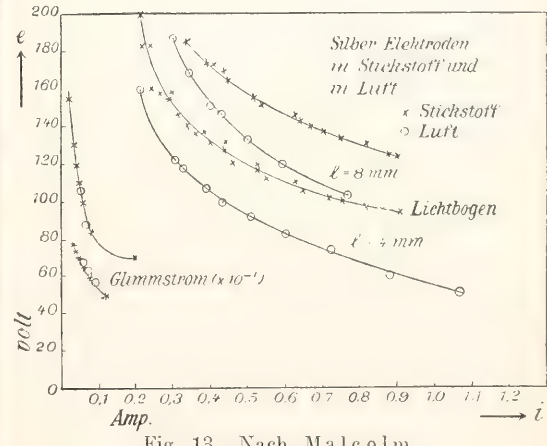


Fig. 13. Nach Malcolm.

fall des Quecksilberlichtbogens ist unabhängig von der Stromstärke zu 5,17 Volt gefunden. Der Anodenfall desselben wächst etwas mit der Stromstärke, wenn die Anode ganz von der Strömung bedeckt ist (Stark).

Mit zunehmendem Druck des umgebenden Gases rücken die Charakteristiken zu höheren Spannungswerten hinauf. Anoden- und Kathodenfall wachsen dabei nur langsam, das Spannungsgefälle in der Lichtbogensäule dagegen schneller.

2b) Stabilität der Lichtbogenentladung. Die Charakteristik des Lichtbogens gibt Aufschluß über die Bedingungen, unter denen seine Beteiligung an einem elektrischen Stromkreise möglich ist. Welche von diesen

Möglichkeiten in Abhängigkeit von den übrigen Verhältnissen des Stromkreises wirklich eintritt, d. h. welcher Zustand in jedem Falle stabil verwirklicht werden kann, muß besonders untersucht werden. Es sei eine Lichtbogenstrecke mit einem Vorschaltwiderstande w und einer elektromotorischen Kraft E zu einem Stromkreise gestaltet, in dem sich ein Gleichgewicht mit der Stromstärke i_g eingestellt habe. Dann muß die Beziehung gelten

$$E - i_g w = e_g \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 7)$$

falls e_g die zum Strome i_g gehörige durch die Charakteristik bestimmte Klemmenspannung am Lichtbogen ist. Nun trage man in dem Charakteristikendiagramm einmal die Lichtbogencharakteristik $e = f(i)$, dann die Funktion $E - iw$ auf (Fig. 14). Die

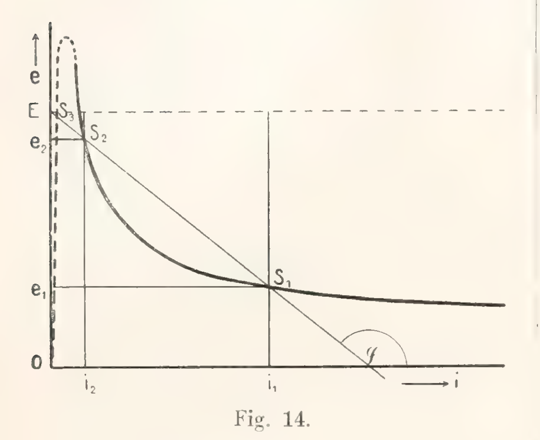


Fig. 14.

letztere stellt sich als eine durch den Punkt E der Ordinatenachse gelegte gegen die Abszissenachse um einen Winkel φ gedrehte Gerade $E + i\,\mathrm{tg}\varphi$ dar, wobei $\mathrm{tg}\varphi = -w$ gewählt ist. Sie soll weiterhin als Widerstandslinie bezeichnet werden. Man sieht, daß dann in dem Schnittpunkte S_1 die Beziehung $E - i_1 w = e_1$ gilt, daß er also einem möglichen Stromzustand angehört. Indessen erfüllt auch der Schnittpunkt S_2 diese Bedingung, und es fragt sich, wodurch ein solcher Schnittpunkt sich als die Darstellung eines stabilen Stromzustandes erkennen läßt. Stabil ist ein Stromzustand dann, wenn sich nach einer Störung der alte Zustand von selbst wieder herstellt. Das ist, wie Kaufmann zuerst zeigte, bei solchen Schnittpunkten der Fall, für die

$$\frac{de}{di} - \mathrm{tg}\varphi > 0 \text{ ist, oder}$$

$$\frac{de}{di} + w > 0 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 8)$$

Das sind solche Schnittpunkte, in denen die Widerstandslinie steiler verläuft, als die Charakteristik. Demnach entspricht Punkt S_1 einem stabilen, S_2 einem labilen Zustande des Lichtbogens. Bei der Charakteristik des Lichtbogens ist $\frac{de}{di}$ stets < 0 und zwar um so mehr, je kleiner die Stromstärke ist. Daher muß man, um einen Lichtbogen stabil unterhalten zu können, stets einen Widerstand vorschalten, der wenigstens dem absoluten Betrage von $\frac{de}{di}$ gleich sein muß (Beruhigungs- oder Stabilisierungswiderstand). Läßt man die elektromotorische Kraft bei konstant gehaltenem Vorschaltwiderstand variieren, so bedeutet das im Diagramm, daß sich die Widerstandslinie sich selber parallel verschiebt (vgl. Fig. 15). Variiert man andererseits den Vorschaltwiderstand bei konstanter elektromotorischer Kraft, so bedeutet das im Diagramm, daß sich die Widerstandslinie um den Punkt E dreht. Die Schnittpunkte S_1, die dabei durchlaufen werden, liefern

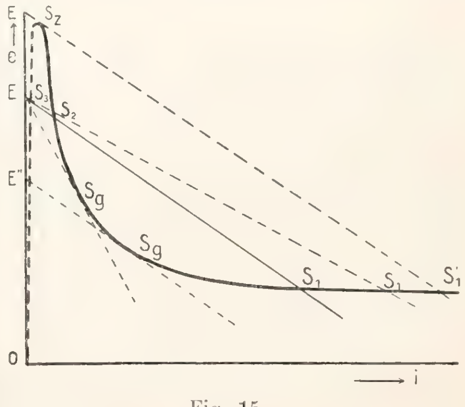


Fig. 15.

die Stromstärken, die sich jeweils einstellen. Sowohl bei Verkleinerung von E (bei konst. w), als auch bei Vergrößerung von w (bei konst. E) kommt man zu einer Lage der Widerstandslinie, bei der sie die Charakteristik nur noch tangiert und Punkt S_1 mit S_2 im Punkte S_g zusammenfällt. Dann ist

$$\frac{de}{di} + w = 0 \text{ oder } w = -\frac{de}{di} \qquad 9)$$

Der betreffende Berührungspunkt S_g bestimmt die kleinste Stromstärke, bei der unter den gewählten Bedingungen der Lichtbogen unterhalten werden kann (Grenzstromstärke). Man sieht, daß man die zu kleinen Stromstärken gehörigen Punkte der Charakteristik nur mit hohen elektromotorischen Kräften und großen Vorschaltwiderständen verwirklichen kann.

Die Ayrtonsche Gleichung $e = \frac{a}{i} + b$ ergibt

$$\frac{de}{di} = -\frac{a}{i^2} = -\frac{\alpha + \beta l}{i^2} \quad . \quad . \quad 10)$$

Kennt man für einen Lichtbogen die Konstanten der Ayrtonschen Gleichung, so ergibt sich der Kleinstwert des für eine Bogenlänge l und Stromstärke i erforderten Beruhigungswiderstandes zu

$$w = \frac{\alpha + \beta l}{i^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

$i^2 w = \alpha + \beta l$ ist die in diesem Falle im Vorschaltwiderstande absorbierte Energie. Falls, wie oben diskutiert, $\alpha = 0$ ist, vereinfacht sich diese Beziehung in

$$w = \frac{\beta l}{i^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

2c) Zündung des Lichtbogens. Legt man an eine Lichtbogenstrecke Spannung an, so geht zunächst kein Strom über; erst bei beträchtlicher Vergrößerung der Spannung beginnt ein sehr schwacher Stromübergang (stille Entladung), bis der Strom schließlich sprunghaft auf einen hohen Wert steigt und die Lichtbogenentladung einsetzt. Dieses Verhalten läßt darauf schließen, daß wir die Charakteristik im Zündgebiete etwa so zu ergänzen haben, wie es Figur 14 (und auch schon in Fig. 11) geschehen ist. Wir haben dann stets noch einen dritten der stillen Entladung entsprechenden Schnittpunkt S_3 mit der Widerstandslinie, und zwar handelt es sich nach der Bedingung 8) um einen stabilen Zustand. Wird nun E vergrößert, so rückt die Widerstandslinie sich selbst parallel in die Höhe, bis Punkt S_2 und S_3 zu einem indifferenten Punkte S_z zusammen-

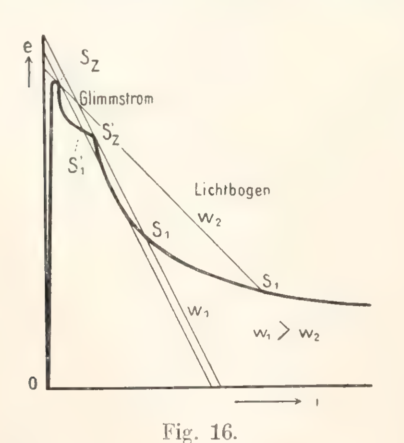


Fig. 16.

rücken, und nun die Entladung sprunghaft in den durch den stabilen Punkt S_1 definierten Lichtbogenzustand übergeht. In Wirklichkeit verläuft die Charakteristik im Zündungsgebiete komplizierter, etwa so wie es schematisch in Figur 16 dargestellt ist. Ist dann der Vorschaltwiderstand groß genug, so springt die Entladung vom Punkt S_z zunächst auf einen stabilen Punkt S_1', welcher der sogenannten Glimmstromentladung angehört. Bei noch weiterer Steigerung von E und Verschiebung der Widerstandslinie springt dann die Glimmstromentladung von S_z' in die Lichtbogenentladung (S_1) über. Ist der Vorschaltwiderstand klein genug, so wird das Glimmstromgebiet übersprungen.

Gewöhnlich zündet man den Lichtbogen nicht durch Spannungserhöhung, sondern dadurch, daß man die Elektroden vorübergehend zur Berührung bringt. Es wird später gezeigt werden, daß der Zündgipfel der Charakteristik um so niedriger liegt, je heißer die Elektroden sind. Bei direkter Berührung der Elektroden entwickelt sich nun an den Elektroden soviel Hitze, daß der Zündgipfel unter die den betreffenden Verhältnissen entsprechende Widerstandslinie heruntergedrückt wird, so daß sich nun beim Auseinanderziehen sogleich die bei Punkt S_1 stabile Lichtbogenentladung einstellen kann.

A 3. Die Wärmeentwickelung in der Lichtbogenentladung. Die im Lichtbogen abgegebene elektrische Energie wird dort in Wärme verwandelt, welche durch Wärmeableitung in den Elektroden, durch Konvektion und Ausstrahlung wegwandert. Einer gegebenen elektrischen Leistung muß daher eine um so höhere Temperatur des Lichtbogens entsprechen, je schlechter die Wärmeleitung der Elektroden und des umgebenden Gases ist. Granquist hat gezeigt, daß beim Kohlenlichtbogen 42% der entwickelten Wärme durch die Anode, 37% durch die Kathode fortgeleitet werden. Ein großer Teil der Unterschiede zwischen der Lichtbogenentladung mit Kohle und Metallen beruht auf dem großen Unterschied in der Wärmeleitung beider Materialien. Ebenso beruht sicher ein Teil der Wirkungen, die Einbettung der Lichtbogenentladung in Wasserstoff hervorbringt, auf dessen guter Wärmeleitung.

Die Wärmeentwickelung verteilt sich in dem Lichtbogen entsprechend dem Potentialfall. So ist sie beim Kohlenlichtbogen an der Anode am größten und gibt dort zur Bildung des positiven Kraters Anlaß. An der Kathode ist sie kleiner; dem entspricht der kleinere negative Krater. Darum bleibt auch die positive Kohle nach dem Auslöschen des Lichtbogens länger glühend, als die negative. In der Lichtbogensäule selbst ist die Wärmeentwickelung am kleinsten.

Infolge der starken Wärmeentwickelung an der Anode sublimiert Kohle von der Anode zur Kathode und schlägt sich dort als Graphit nieder.

Die Temperaturen, die im Lichtbogen auftreten, sind die höchsten, die wir künst-

lich erzeugen können. Fast alle hineingebrachten Elemente und Verbindungen schmelzen in ihm. Zahlreiche Untersuchungen haben sich mit der Ermittelung der Lichtbogentemperatur beschäftigt. Es ergibt sich als Mittel der zuverlässigsten Beobachtungen, daß die Temperatur des positiven Kraters rund 3500 bis 4000° C beträgt, diejenige des sehr viel kleineren negativen Kraters 3100°. Beide Temperaturen sind unabhängig von Stromstärke und Bogenlänge. Das spricht dafür, daß beide Krater wohl die Verdampfungstemperatur der Kohle besitzen, so daß die Abweichungen der beiden Zahlen vermutlich lediglich in der großen Unsicherheit der Messungen ihren Grund haben. Während also die Temperatur der Krater von Stromstärke und Bogenlänge unabhängig ist, ändert sich die Größe der Kraterfläche je nach der Wärmezufuhr. Nach Untersuchungen von Ayrton, Granquist, Reich lassen sich die Radien r beider Krater oberhalb 4 Amp. durch die Beziehung

$$r = m + ni \quad \ldots\ldots\ldots \quad 7)$$

ausdrücken, woraus für die Kraterfläche F folgt

$$F = a + bi + ci^2 \quad \ldots\ldots \quad 8)$$

Die Konstanten m und n hängen von der Bogenlänge ab. Für einen Kohlenbogen von 9 mm Bogenlänge war am positiven Krater z. B. $m = 0{,}16$ $n = 0{,}009$, am negativen $m = 0{,}01$ $n = 0{,}009$.

Es muß also eine Mindestgröße beider Krater gesichert sein, ehe die Lichtbogenentladung überhaupt bestehen kann. Beim Kohlenlichtbogen hat diese Mindestgröße für den positiven Krater einen höheren Wert, wie für den negativen. Doch zeigt sich, daß allgemein nur die Minimalgröße des negativen Kraters eine prinzipielle Bedeutung hat. Denn es lassen sich, wie schon erwähnt, Lichtbogenentladungen verwirklichen, bei denen überhaupt kein positiver Krater vorhanden ist, z. B. zwischen einer Flüssigkeit als positiver, Kohle oder Metall als negativer Elektrode. Dagegen entscheidet das Vorhandensein des Minimalkraters auf der negativen Seite über Sein und Nichtsein der Lichtbogenentladung. Ohne weißglühenden negativen Krater von der Minimalgröße ist unter keinen Umständen Lichtbogenentladung möglich. Die grundlegende Bedeutung dieser Tatsache wird bei der Theorie der Lichtbogenentladung in Erscheinung treten.

Die Temperatur des Lichtbogens selbst ist von derselben Größenordnung wie die der Krater, doch ist sie wahrscheinlich von der Stromstärke, dann auch von Art und Druck des umgebenden Gases abhängig; es handelt sich im Bogen ja um richtige Joulesche Stromwärmeentwickelung. Im Kern der Leitungsbahn ist sie am höchsten und fällt nach außen hin ab.

A 4. Die Lichtentwickelung der Lichtbogenentladung. Die Lichtentwickelung im Lichtbogen entspricht den elektrischen und Wärmeverhältnissen. Die Krater des Kohlenlichtbogens, als hochtemperierte feste Körper, senden hellweißes Licht aus, welches ein kontinuierliches Spektrum liefert. Die Helligkeit des Kraters ist 120 Kerzen pro qmm (die Sonne strahlt 1591 Kerzen pro qmm). Der Bogen, als elektrisch erregtes Gas, sendet Licht aus, welches das reichgegliederte Bandenspektrum der Kohle und des Cyans mit überlagerten Linienspektren der Metallbeimengungen zeigt. Die Strahlung des Bogens selbst beträgt beim gewöhnlichen Kohlenlichtbogen nur 2 bis 5% von derjenigen der Krater, die des positiven beträgt 85%, die des negativen 10% der ganzen Strahlung. Zusätze von geeigneten Metallsalzen und auch Metalloxyden bewirken indessen, daß der Bogen selbst ebenfalls intensiv zu leuchten beginnt, wovon man bei den sogenannten Flammenbogenlampen Gebrauch macht (vgl. C 3 b). Durch Metallzusätze zu den Kohlen wird das Bandenspektrum der Kohle zurückgedrängt, doch zeigen andererseits schon Elektroden aus gewöhnlichem Eisen durch dessen Kohlenstoffgehalt das Bandenspektrum mit. Die Linienspektren der Beimengungen sollen besonders an der Kathode auftreten; nach Lenard andererseits besteht der Lichtbogen aus einer Reihe umeinander gelagerter Mäntel, deren jeder eine der Spektralserien des zugesetzten Metalles für sich ausstrahlt, der äußerste Mantel die Hauptserie (vgl. den Artikel „Spektroskopie"). Brennt der Kohlenlichtbogen in seinen eigenen Gasen (Einschlußlampe), so ist die Zusammensetzung seiner Lichtstrahlung nicht verschieden von der des offenen Lichtbogens (Stockhausen). Daß solche Lampen praktisch relativ viel Violett und auch Ultraviolett aussenden, liegt daran, daß sie mit größerer Bogenlänge brennen. (vgl. C 3 b). Die Linien des Lichtbogenspektrums zeigen leicht die Erscheinung der Selbstumkehr (vgl. den Artikel „Spektroskopie"): Die Strahlung des heißen inneren Kerns durchsetzt den kälteren Dampf der äußeren Hülle und erfährt dort eine Absorption derjenigen Wellenlängen, die die Hülle selbst ausstrahlt. Da der äußere Dampf zugleich weniger dicht ist, so sind die von ihm ausgesandten Linien schmäler als die des Kerns, und die Spektrallinien erscheinen von einer dunklen Absorptionslinie durchbrochen.

Bei dem Quecksilberlichtbogen strahlt im wesentlichen der Dampf, die Kraterstrahlung tritt sehr in den Hintergrund. Er zeigt das Linienspektrum des Quecksilbers, in dem rote Anteile ganz fehlen.

Daher das leichenhafte Aussehen der Gegenstände in diesem Lichte. Zwischen Quecksilberamalgamen erhält man auch die Linien der Zusätze, allerdings nicht mit Sicherheit.

Die Lichtausstrahlung des Kohlenlichtbogens ist nach verschiedenen Azimuten hin sehr verschieden. Figur 17 zeigt für den Fall, daß die obere Kohle positiv ist, die Verteilung graphisch, indem die in jeder Richtung gemessene Lichtstärke durch die Länge des in dieser Richtung gezogenen Strahles aufgetragen ist. Unter 50° ist die Strahlung am größten, bei 0 bis 20° ist sie sehr klein, weil die negative Kohle dort Schatten wirft. Im einzelnen variiert diese Verteilung mit Bogenlänge, Kohlendurchmesser und Stromstärke. Denkt man sich die Strahlung des Lichtbogens gleichmäßig auf alle Richtungen um den Krater als Kugelmittelpunkt verteilt, so wäre die Lichtverteilungskurve ein Kreis, dessen Radius die mittlere sphärische Lichtstärke der Lichtquelle mißt. Man kann aus der gemessenen Lichtkurve diesen Radius rechnerisch oder konstruktiv stets finden (vgl. den Artikel „Photometrie"). Entsprechend ergibt sich die mittlere hemisphärische Lichtstärke, wenn man die Strahlung gleichmäßig über eine um den Krater als Mittelpunkt geschlagene, nach unten oder nach oben gewölbte Halbkugel verteilt denkt. Durch lichtzerstreuende Glasglocken und Reflektoren werden solche Verteilungen praktisch mit Annäherung erreicht.

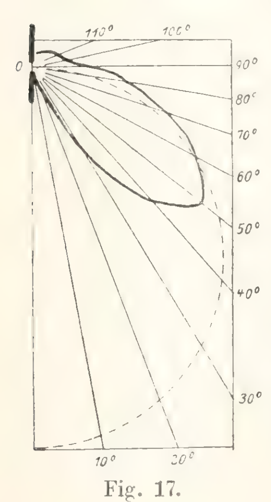


Fig. 17.

Die mittlere sphärische Lichtstärke L eines Kohlenlichtbogens hängt von der Stromstärke i nach der Beziehung

$$L = 100\left\{i + \left(\frac{i}{4}\right)^2\right\} - 200 \quad . \quad . \quad 13)$$

ab.

Bei konstant gehaltener Stromstärke hat sie bei einer bestimmten Bogenlänge ein Maximum. Das hängt mit der Form und Schattenwirkung der negativen Kohle, sowie mit der mit der Bogenlänge variierenden Größe des positiven Kraters zusammen.

Ueber die spezifische Lichtausbeute (mittlere sphärische Lichtstärke in HK pro Watt Energieaufwand) sowie den Wirkungsgrad des Lichtbogens siehe C, 3a.

A 5. Chemische Wirkungen der Lichtbogenentladung. Durch seine hohe Temperatur und vielleicht auch seinen eigentümlichen elektrischen Zustand ist der Lichtbogen geeignet, besondere chemische Wirkungen auszuüben. Die Kohlengase des Kohlenlichtbogens besitzen z. B. in sehr hohem Grade die Fähigkeit, Sauerstoff an sich zu reißen, und verbrennen in der Atmosphäre sehr lebhaft zu Kohlenoxyd und Kohlensäure. Fast alle Metalloxyde werden aus diesem Grunde im Kohlenlichtbogen reduziert. Andererseits gelingt es in der hohen Temperatur des Lichtbogens Verbindungen zu erzeugen, die sich sonst sehr schwer erzielen lassen; so Karbide, Silicide und Boride (vgl. C 1 b). In Gegenwart von Wasserstoff, auch in feuchter Luft bildet der Kohlenlichtbogen Acetylen (CH), im letzteren Falle auch Cyanwasserstoff (CNH). Besonders bedeutsam ist die Tatsache in neuerer Zeit geworden, daß der Lichtbogen in der Atmosphäre den Stickstoff der Luft zu Stickoxyd (NO) oxydiert (vgl. C 2). Da die genannte reduzierende Wirkung der Kohle diesem Prozeß entgegenarbeitet, so empfiehlt es sich in diesem Falle metallische Elektroden oder (nach Rasch) noch besser Elektroden zweiter Klasse zu verwenden. Anderenfalls würde sich das Stickoxyd wegen der bei der hohen Temperatur so großen Reaktionsgeschwindigkeit wieder zersetzen.

Der Prozeß beruht auf folgendem Prinzip: das chemische System Sauerstoff-Stickstoff wird bei Berührung mit dem Lichtbogen (nach Haber durch wesentlich elektrische Einflüsse) in ein Gleichgewicht geschoben, dem die Bildung einer gewissen Menge Stickoxyd entspricht. Hört die Berührung mit dem Lichtbogen auf, so kehrt das System mit um so größerer Reaktionsgeschwindigkeit in den alten Zustand zurück, je höher die Temperatur ist. Man kann daher die Rückbildung des Stickoxyds verhindern, wenn man die den Lichtbogen umspülende Luft möglichst rasch auf tiefe Temperatur bringt.

Die sich bildenden Stickoxyde sind bei der Bogenlampenbeleuchtung gelegentlich eine lästige Quelle von Luftverschlechterung. Darum ist man bei manchen Lampen bedacht, sie, z. B. durch Ammoniumkarbonat, unschädlich zu machen

A 6. Akustische Vorgänge bei der Lichtbogenentladung. 6 a) Zischen. Bei größeren Stromstärken beginnt der Kohlenlichtbogen in der Atmosphäre häufig ein zischendes Geräusch hören zu lassen, welches sich auch bei der Bogenlampenbeleuchtung gelegentlich unangenehm bemerkbar macht. Abgesehen davon, daß Inhomogenitäten der Kohlenelektroden solches Zischen verursachen

können, gilt nach Frau Ayrton folgendes: zu jeder Bogenlänge und Kohlendicke gehört eine kritische Stromstärke, die nicht überschritten werden darf, ohne daß Zischen eintritt. Je größer die Bogenlänge, desto höher diese Stromstärke. Daher kann ein ruhiger Lichtbogen auch zum Zischen kommen, wenn seine Bogenlänge verringert wird. Als Ursache des Zischens fand Frau Ayrton das durch Luftwirbel veranlaßte Eindringen kalter Luft in den Krater. Bei Luftabschluß und in Wasserstoff fand sich demgemäß niemals Zischen. Das Eindringen der Luft befördert die Verbrennung der Kohle und

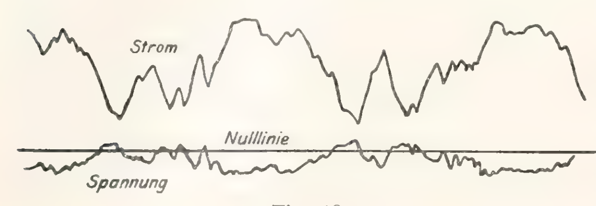


Fig. 18.

vergrößert den positiven Krater. Die Folge in elektrischer Hinsicht ist, daß die Klemmenspannung durch das Zischen um 6 bis 10 Volt sinkt, die Stromstärke um 2 bis 3 Amp. zunimmt (vgl. Fig. 3). Die Klemmenspannung des zischenden Bogens bleibt bei weiterer Steigerung der Stromstärke von der Stromstärke unabhängig konstant. Bei dem Zischen schwankt übrigens Stromstärke und Klemmenspannung unregelmäßig auf und ab, wir Figur 18 nach einer oszillographischen Aufnahme zeigt.

6 b) Summen. Gelegentlich ist auch am Gleichstromlichtbogen ein summendes Geräusch beobachtet worden, welches mit den Reguliermechanismen der Bogenlampe in Beziehung zu stehen scheint. Die entsprechenden Strom- und Spannungsschwankungen zeigt Figur 19.

6 c) Sprechender Lichtbogen. H. Th. Simon fand 1897, daß sich der Gleichstromlichtbogen als Telephon von sehr

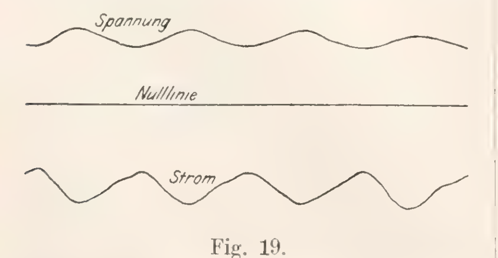


Fig. 19.

vollkommenen Klangeigenschaften benutzen läßt, wenn man ihm Mikrophonströme überlagert. Wie ja überhaupt der Lichtbogen auf Stromschwankungen durch Schallentwickelung reagiert. Eine für den Versuch zweckmäßige Schaltung zeigt Figur 20. Der Vorgang der Schallerzeugung beruht vermutlich darauf, daß mit wachsendem Strome, sei es durch Erhöhung der Temperatur, sei es durch Vergrößerung der Dissoziation des Gases das Gasvolumen des Lichtbogens wächst. Genaue Messungen (Rihl) haben ergeben, daß die Wirkung mit dem Quadrate der Bogenlänge, sowie mit dem Quadrate der Stärke des übergelagerten Wechselstromes wächst. Bei konstanter Bogenlänge und konstanter Wechselstromstärke, aber variierender Gleichstromstärke ist die Schallwirkung der Klemmenspannung proportional, d. h. sie wird mit abnehmender Gleichstromstärke nach dem durch die Charakteristiken dargestellten Gesetz größer. Diese Gesetzmäßigkeiten zeigen, daß ein bestimmter Bruchteil der zugeführten Wechselstromenergie in Schallenergie verwandelt wird, ein Bruchteil, der mit zunehmender Bogenlänge rasch wächst.

6 d) Der lauschende Lichtbogen. Leitet man Schallwellen über den Lichtbogen, so beeinflussen die Druckschwankungen das Gasvolumen und damit die elektrischen Ver-

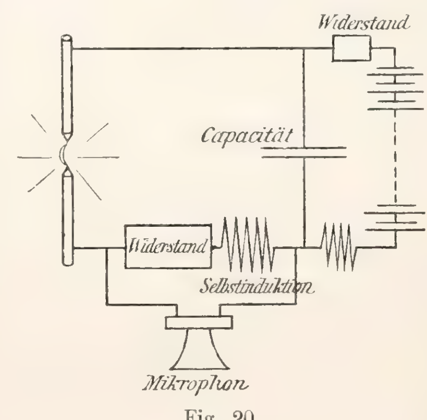


Fig. 20.

hältnisse, so daß entsprechende Schwankungen von Stromstärke und Klemmenspannung auftreten (Simon 1897). Diese lassen sich z. B. nach der Schaltung der Figur 21 in einem fernen Telephon hörbar machen, so daß der Lichtbogen auch als Mikrophon dienen kann. Von zwei hintereinander geschalteten Lichtbogen muß der eine das hören lassen, was man in der Nähe des anderen ertönen läßt.

A 7. Theorie der Lichtbogenentladung. Von einer Theorie der Lichtbogenentladung muß man verlangen, daß sie die in den vorhergehenden Abschnitten dargestellten Tatsachen von einfachen Grundvorstellungen

aus zu übersehen gestattet. Erst in neuerer Zeit ist es im Anschluß an die allgemeine ionentheoretische Aufklärung der Elektrizitätsleitung in Gasen gelungen, eine solche Theorie zu geben (J. J. Thomson, J. Stark 1903). Ist es auch bisher nicht möglich gewesen, diese Theorie in umfassender Weise quantitativ zu formulieren, so ergibt sie doch qualitativ von allen Eigenschaften des Lichtbogens recht befriedigend Rechenschaft. Sie geht aus von der im Abschnitt 3 hervorgehobenen, durch mancherlei Versuche erwiesenen Tatsache, daß Weißglut der negativen Ansatzstelle des Lichtbogens Existenzbedingung der Lichtbogenentladung ist; während sich die Glut des positiven Kraters trotz seiner Aufdringlichkeit als nebensächliche und nicht unbedingt erforderliche Beigabe erweist.

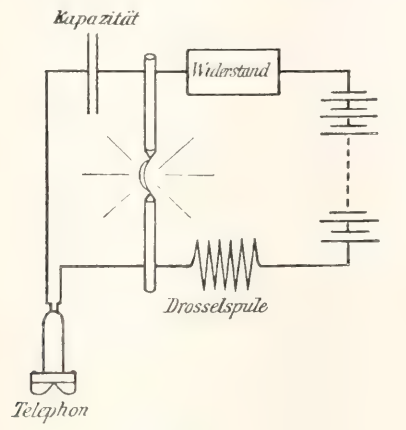


Fig. 21.

Nach der Ionentheorie werden die Gase dadurch zu Leitern der Elektrizität, daß ihre Moleküle in elektrisch geladene Komponenten, die Ionen, gespalten werden. Diese Ionen bilden dann gewissermaßen die Fahrzeuge für den Elektrizitätsübergang zwischen den Elektroden; die positiven Ionen werden in dem elektrischen Felde zur Kathode, die negativen zur Anode getrieben, analog wie das bei der elektrolytischen Leitung geschieht. Nur daß hier die Beweglichkeiten erheblich größer sind als in den Elektrolyten. Die Ionen eines gasförmigen Leiters verhalten sich im übrigen wie die Gasmoleküle es nach den Vorstellungen der kinetischen Gastheorie tun: Sie schwirren im Raum umher und stoßen auf ihren Wegen miteinander und mit unzersetzten Gasmolekülen zusammen. Dabei werden sich die getrennten Bestandteile immer wieder zu vereinigen suchen: d. h. ein ionisiertes Gas wird sehr bald wieder nichtleitend, wenn nicht dauernd für Ionenerneuerung gesorgt wird. Diese Ionenerneuerung findet selbsttätig statt, wenn sich ein Gas unter der Wirkung eines genügend starken elektrischen Feldes befindet, und zwar durch sogenannten Ionenstoß. Einige wenige Ionen müssen wir stets als vorhanden annehmen, da erfahrungsgemäß die Luft eine schwache Leitfähigkeit stets behält. Sie sind es auch, welche die Abschnitt 2b erwähnte dunkle Entladung tragen. Diese Ionen erwerben unter der Wirkung des Feldes zwischen zwei Zusammenstößen eine so große kinetische Energie, daß sie bei einem Zusammenstoß mit einem neutralen Molekül dieses in seine Ionenbestandteile zerspalten. Dabei ist erfahrungsgemäß die ionisierende Kraft der negativen Ionen oder der Elektronen erheblich größer als die der positiven. Man darf meist die ganze Stoßionisierung auf Rechnung der Elektronen setzen. Bei der hohen Temperatur des Lichtbogens genügen offenbar schon die relativ niedrigen Feldstärken, wie sie in der Lichtbogensäule herrschen, um die Ionisierung durch Ionenstoß einzuleiten, während bei tiefen Temperaturen erheblich höhere Feldstärken dazu nötig sind (vgl. den Artikel „Glimmentladung").

Außer der Stoßionisierung spielt für die Ionenerneuerung im Lichtbogen die weißglühende Fläche des negativen Kraters eine entscheidende Rolle. Durch sie unterscheidet sich diese Entladungsform typisch von der lediglich auf Ionenstoßwirkung beruhenden Glimmstromentladung zwischen kalten Elektroden. Der negative Krater zeigt wie jeder weißglühende Leiter das sogenannte glühelektrische Phänomen (vgl. den Artikel „Glühelektrische Erscheinungen"): Während seine Oberfläche in kaltem Zustande für die freien Elektronen eine undurchdringliche Wand bildet, läßt sie bei höherer Temperatur in reichem Maße Elektronen austreten; um so mehr, je höher ihre Temperatur ist. Die austretenden Elektronen erhalten dann im Kathodenfall eine große kinetische Energie und entfalten in der Lichtbogensäule eine lebhafte Ionenstoßwirkung. Die Weißglut des negativen Kraters andererseits wird durch den Aufprall von positiven Ionen aufrecht erhalten, die aus der Lichtbogensäule in den Bereich des Kathodenfalles geraten und dort die erforderliche kinetische Energie aufnehmen.

Aehnlich liegt die Sache am positiven Krater. Hier prallen die Elektronen nach dem Durchlaufen des Anodenfalles auf und heizen den positiven Krater; meist sogar, wegen des größeren Anodenfalles, erheblich mehr als es beim negativen Krater durch die positiven Ionen geschieht. Auch erzeugen sie beim Aufprall durch Ionenstoß reichlich Ionen, von denen die positiven in die Lichtbogensäule wandern. Das glühelektrische

Phänomen ist auch an dem weißglühenden positiven Krater wirksam. Da aber hier die Elektronen dem Felde entgegen austreten müssen, so wirkt der davon herrührende Elektronendruck wie eine elektromotorische Gegenkraft, welche mit dazu beiträgt, den Anodenfall größer zu machen, als den Kathodenfall. Wegen der stärkeren Erhitzung, die im Kohlenlichtbogen der positive Krater erfährt, ist die elektromotorische Kraft des glühelektrischen Phänomens am positiven Krater etwas größer wie am negativen, Beim Auslöschen des Lichtbogens läßt sich dieser Ueberschuß konstatieren. Und zwar wächst er einen Bruchteil einer Sekunde nach dem Ausschalten zunächst an, weil sich der negative Krater schneller abkühlt als der größere positive. Nach der Erreichung ihres Maximums verschwindet dann die elektromotorische Kraft sehr rasch mit der abnehmenden Temperatur.

Wie aber kommt Kathodenfall und Anodenfall zustande? Man kann sich das in folgender Weise anschaulich machen (siehe Fig. 22): Es handelt sich hier um eine allgemeine Eigentümlichkeit aller Gasleitungserscheinungen.

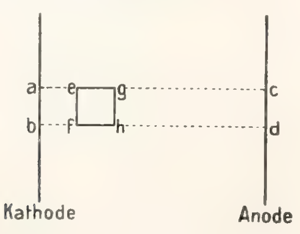


Fig. 22.

Durch ein Volumenelement ef hg des stromtragenden Gases wandern in einer bestimmten Zeit alle im Raum gh dc entstehenden positiven Ionen in der Richtung zur Kathode, alle im Raume ae fb entstehenden negativen in der Richtung zur Anode. Sehen wir von einem Austritt von Ionen aus den Flächen ab und cd zunächst ab, so übersieht man leicht folgendes: Es muß eine Schicht zwischen Anode und Kathode geben, die gleichviel positive Ionen von rechts wie negative von links erhält; je näher man aber an die Anode kommt, desto weniger positive Ionen werden von der Anodenseite her geliefert und desto mehr negative von der Kathodenseite. Somit muß vor der Anode ein Ueberschuß von negativer Elektrizität liegen, d. h. es muß ein Ansteigen der Feldstärke nach der Anode hin stattfinden. Genau so vor der Kathode ein Ueberschuß von positiven Ionen, d. h. die Feldstärke steigert sich nach der Kathode hin. Ob der Anodenfall oder der Kathodenfall größer ist, hängt nun noch von den Beweglichkeiten der positiven und negativen Ionen ab. Ist, wie meist, die Beweglichkeit der negativen Ionen größer, wie die der positiven, so fällt der Anodenfall größer aus, wie der Kathodenfall.

Beim Lichtbogen addieren sich zu den aus dem Raum aefb stammenden negativen Elektronen noch die aus der weißglühenden Fläche ab austretenden Elektronen; zu den aus cdhg stammenden positiven die an der Anodenfläche cd durch den Elektronenstoß gebildeten positiven Ionen. Die geschilderte Entstehung von Anodenfall und Kathodenfall wird dadurch etwas modifiziert, aber in ihrem Wesen nicht verwischt. Von dem so entstehenden Kathodenfall ist die dem glühelektrischen Effekt zu verdankende elektromotorische Kraft abzuziehen, zu dem Anodenfall ist sie hinzuzuaddieren, um den wirklich vorhandenen Kathoden- und Anodenfall zu finden.

Es bleibt zu zeigen, daß diese Theorie in der Tat die Erscheinung der Lichtbogenentladung in allen ihren Einzelheiten befriedigend beschreibt. Zunächst übersieht man, daß sich Kathodenfall und Anodenfall automatisch auf feste Beträge regulieren, deren Summe die Seite 207 definierte „Minimalspannung“ darstellt. Es muß sich nämlich der Kathodenfall stets so einregulieren, daß die Weißglut des negativen Kraters sichergestellt bleibt. Denn wenn einmal die Temperatur des Kraters sinken würde, würde sofort der Elektronenaustritt kleiner, also der Kathodenfall größer werden; infolgedessen würde das Bombardement des Kraters mit positiven Ionen sofort wachsen, und die Temperatur müßte wieder zunehmen. Andererseits besteht in der Gasentladung die Tendenz, sich auf die direkte Bahn zwischen den Elektroden zusammenzuziehen, weil sie dort den kleinsten Widerstand findet. Aus diesem Grunde ist auch der Kern des Lichtbogens am heißesten, und auch die Krater müssen sich an der Ansatzstelle dieses Kerns am meisten erhitzen. Die Folge ist, daß dort auch wieder mehr Elektronen austreten, welche die Leitfähigkeit des Bogenkerns steigern. Kurz, der Prozeß muß auf eine möglichst hohe Erhitzung des Kraterkerns hinsteuern, und das findet erst seine Begrenzung, wenn die Siedetemperatur des Kraterkerns erreicht ist. Dadurch ist also rückwirkend auch der Kathodenfall bestimmt und man sieht, daß derselbe von der Stromstärke unabhängig wird. Eine Steigerung der Stromstärke bedeutet lediglich eine Vergrößerung der auf Siedetemperatur zu haltenden Kraterfläche. Aehnlich ist es mit dem Anodenfall, der sich durch die Notwendigkeit begrenzt findet, den Elektronen die zur Ionenstoßwirkung nötige kinetische Energie zu vermitteln. Die zur Ueberwindung von

Kathodenfall + Anodenfall ausreichende Spannung muß mindestens zur Verfügung stehen, ehe eine Lichtbogenentladung möglich ist. Auch die Stromstärke darf nicht unter einen bestimmten Minimalwert sinken, bevor die Lichtbogenentladung aufhört. Denn eine gewisse Mindestfläche muß wenigstens auf Weißglut gehalten werden, sonst fehlt es an der zu Stoßionisierung des Gases nötigen Elektronenmenge.

Mit der Erklärung des Anoden- und Kathodenfalles ist auch das Abschnitt 2 berührte Rätsel der sogenannten elektromotorischen Gegenkraft des Lichtbogens gelöst, welches seinerzeit viele Forscher beschäftigt hat. Man glaubte in Analogie zu der Polarisation bei den elektrolytischen Vorgängen, daß man diese elektromotorische Gegenkraft des Lichtbogens nach seinem Verlöschen müsse als elektromotorische Kraft nachweisen können. Daß derartige Versuche vergebens sein müssen, ist nach der Ionentheorie klar. Denn der Unterschied der Ionenkonzentration, welche Ursache der elektromotorischen Gegenkraft ist, wird wegen der großen Geschwindigkeit der Ionenbewegungen unmeßbar schnell ausgeglichen, sobald keine Spannung mehr am Lichtbogen wirkt.

Für die Wärmewirkungen am Lichtbogen gibt die Ionentheorie eine unmittelbar anschauliche Erklärung. Daß dabei die Wärmeleitfähigkeit der Elektroden eine sehr wichtige Rolle spielen muß, liegt auf der Hand. Denn je größer die Wärmeableitung durch die Elektroden ist, desto mehr elektrische Arbeit muß aufgewendet werden, um die Weißglut der Krater zu unterhalten. Es ist also eine selbstverständliche Folgerung der Theorie, daß Abkühlung der Elektroden die Klemmenspannung der Lichtbogenentladung steigert. Metalle, mit ihrem soviel höheren Wärmeleitvermögen, müssen sich aus diesem Grunde wesentlich anders verhalten wie Kohle; sie müssen relativ schwieriger zur Lichtbogenbildung zu bringen sein. Natürlich sind außerdem spezifische Einflüsse des Materials, der Grad ihrer glühelektrischen Wirkung, ihre Ionisierbarkeit, ihre Ionenbeweglichkeit, der Schmelzpunkt usw. maßgebend. Auch der Einfluß des Gasdruckes ist ganz so, wie es die Theorie erwarten läßt. Daß chemische Sekundärprozesse, wie die Verbrennung der Kohle mit dem Luftsauerstoff, die Klemmenspannung herabsetzen, wie es z. B. beim Zischen des Kohlenbogens (vgl. Fig. 3) stattfindet, paßt in das Bild. Chemische Prozesse bedeuten eine sekundäre Wärmezufuhr, daher ist zur Heizung des Kraters nun weniger Stromarbeit nötig; die Charakteristik sinkt zu tieferen Spannungswerten. Beimengung von metalloidalen Gasen andererseits, die schwerer ionisierbar sind oder deren Ionen sich schneller wiedervereinigen, verlangt Steigerung der Klemmenspannung (vgl. S. 213 Lichtbogen in Wasserstoff).

Den Gang der Charakteristik, wie er Seite 207 gefunden ist, kann man ebenfalls aus der Theorie verstehen: Wächst die Stromstärke, so wächst die entwickelte Wärme mit dem Stromquadrat, daher vergrößert sich der negative und der positive Krater nach einem ähnlichen Gesetze (vgl. Gleichung 8). Das erstere bedeutet lebhafteren Elektronenaustritt, das letztere Vermehrung des Gasvolumens und der in den Gasraum gelieferten positiven Ionen. Also muß der Widerstand der Lichtbogensäule mit zunehmender Stromstärke rasch kleiner werden. Bei einer genügend großen Stromstärke ist dieser Widerstand so klein, daß er neben Anoden- und Kathodenfall verschwindet, d. h. die Klemmenspannung nähert sich asymptotisch der Minimalspannung.

Mit Vergrößerung der Stromstärke ist, wie oben gezeigt, eine Vergrößerung der Lichtbogenionisierung verbunden. Da sich die Ionisierungsvorgänge mit sehr großen Geschwindigkeiten abspielen, so werden die Ionisierungen auch raschen Stromänderungen folgen und entsprechende Volumänderungen bedingen; eben das ist es, was bei den akustischen Vorgängen zutage tritt.

B. Lichtbogenentladungen mit Wechselströmen.

B 1. Allgemeine physikalische Eigenschaften des Wechselstromlichtbogens. Legt man eine Lichtbogenstrecke in einen Wechselstromkreis der normalen technischen Frequenz (50 Perioden), so erhält man in jedem Falle eine Lichtbogenentladung, wenn man die Spannung genügend hoch wählt. Mit niedriger Spannung (Größenordnung 50 Volt) erhält man dagegen nur mit Kohlenelektroden und Elektroden aus Leitern zweiter Klasse einen Wechselstromlichtbogen. An Metallelektroden gelingt es in diesem Falle nicht, eine Lichtbogenentladung aufrecht zu erhalten. Erst wenn die Frequenz der Wechselspannung genügend hoch getrieben wird, ist auch zwischen Metallelektroden ein Wechselstromlichtbogen mit niedriger Spannung möglich. So sind z. B. die hellglänzenden Funken, mit denen sich Leydener Flaschen durch eine Drahtleitung entladen, nichts anderes als Wechselstromlichtbögen sehr hoher Frequenz. Denn solche Entladungen vollziehen sich bekanntlich oszillatorisch als sogenannte gedämpfte elektrische Schwingungen (vgl. den Artikel „Elektrische Schwingungen"). Die Flaschen werden dabei vollständig entladen, d. h. der Lichtbogen wird bei der hohen Frequenz bis zu einer niedrigen Spannung herab unterhalten. Unterhalb 40 Volt

etwa vermag eine Wechselspannung unter keinen Umständen einen Lichtbogen zu unterhalten, ebensowenig wie eine Gleichspannung (Minimalspannung).

Der Wechselstromlichtbogen zwischen Kohlenstiften erscheint im Gegensatz zum Gleichstromlichtbogen symmetrisch, da beide Kohlen abwechselnd zur positiven und negativen Elektrode werden. Beide Kohlenenden stumpfen sich ab und tragen Krater an den Spitzen. Dieselben haben gleiche Größe und gleiches Aussehen, und der violette Lichtbogen verbindet sie als symmetrische Säule. Beim Betrachten im rotierenden Spiegel löst sich der Wechselbogen in Lichtstreifen auf, die abwechselnd in dem einen und anderen Sinne die unsymmetrische Gleichstromverteilung wieder erkennen lassen. Auch der Abbrand ist hier ein symmetrischer. Bei vertikalstehenden Elektroden bewirkt höchstens der aufsteigende heiße Luftstrom eine geringe Unsymmetrie, die aber sekundärer Natur ist. Die Verhältnisse ändern sich wenig, wenn man die Elektroden in andere Gase bringt wie Luft. Auch hier gibt es Entladungsformen, bei denen die Elektroden nicht soviel Gas in den Bogen liefern, daß das Elektrodengas allein Träger der Entladung bliebe. Man beobachtet dann aus den Kratern herausschießende Büschel von der Farbe des Elektrodendampfes, die in die von den umgebenden Gasen gebildete Säule bis zu mehr oder weniger großer Tiefe eindringen. Wenn der Lichtbogen dabei infolge von Gasströmungen oder von magnetischen Einflüssen mit genügender Schnelligkeit seine Lage wechselt, sieht man wohl zwei oder drei solcher Büschel scheinbar gleichzeitig, die in Wirklichkeit nacheinander an verschiedenen Orten auftreten (siehe Fig. 23).

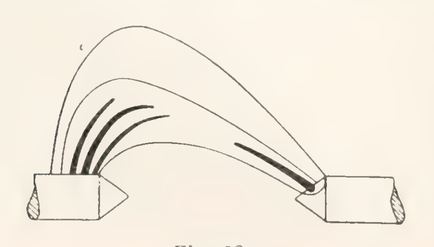


Fig. 23.

B 2. Die elektrischen Eigenschaften des Wechsellichtbogens. 2a) Die Effektivwerte von Strom und Spannung. Leistung. Praktisch interessiert auch hier die Frage, wie sich beim Wechselstromlichtbogen die Effektivwerte der Klemmenspannung E und die Effektivwerte J der Stromstärke einander zuordnen. Hierüber stellte Heubach folgende Sätze auf:

1. bei konstanter Stromstärke steigt die Spannung mit wachsender Bogenlänge,

2. bei konstanter Bogenlänge nimmt die Spannung mit wachsender Stromstärke ab.

Beides stimmt qualitativ mit den bei Gleichstrom gültigen Verhältnissen überein. Zu einer quantitativen Festlegung, wie es bei Gleichstrom durch die Ayrtonsche Formel geschehen ist, ist man bei Wechselbogen noch nicht gelangt. Einfache Beziehungen können, wie weiter unten ersichtlich wird, hier auch kaum walten.

Dagegen läßt sich fast durchweg das Produkt aus der effektiven Spannung E und dem effektiven Strome J als Funktion der Bogenlänge l bei konstanter Stromstärke durch die Beziehung

$$EJ = a + bl \quad . \; . \; . \; . \; . \; 14)$$

darstellen. Das ergibt für eine bestimmte Stromstärke

$$E = A + Bl \quad . \; . \; . \; . \; . \; 15)$$

Bei Kohlenlektroden ist nach Heubach A von der Stromstärke nicht abhängig, B dagegen fand er mit wachsender Stromstärke kleiner werdend. A bedeutet hier wieder die Minimalwechselspannung, mit der der Wechselbogen unterhalten werden kann. Sie war bei Homogenkohlen 45 Volt, bei einer Docht- und einer Homogenkohle 22 bis 25 Volt, bei zwei Dochtkohlen 20 Volt.

Ist L die im Wechselbogen verbrauchte, mit dem Wattmeter zu messende Leistung, so gilt (vgl. den Artikel „Wechselströme") $L = EJf$, wo f der Leistungsfaktor heißt. Er ist $\cos\varphi$, wenn Strom und Spannung sinusförmig verlaufen. Alsdann ist φ die Phasendifferenz zwischen beiden. Anderenfalls bekommt f immer dann einen von 1 verschiedenen Wert, wenn die Kurvenformen von Strom und Spannung in ungleicher Weise von der Sinusform abweichen. Da beim Wechselbogen niemals Strom und Spannung gleichzeitig sinusförmig sein können, vielmehr wegen der nicht geradlinigen Charakteristik stets eins oder das andere stark deformiert werden muß, so hat f beim Wechselbogen stets einen von 1 verschiedenen Wert. Doch geht er kaum unter 0,71 herunter. Er wächst mit wachsender Bogenlänge und mit wachsender Periodenzahl, wofür unten die Erklärung gegeben wird.

Auch der Wechselbogen beginnt bei zu großer Stromstärke zu zischen. Alsdann wird der Leistungsfaktor kleiner, d. h. es wird relativ weniger Energie im Bogen verbraucht; ebenfalls sinkt die Spannung. Beides bestätigt auch hier, daß das Zischen durch eindringende Luft verursacht wird, deren Verbrennungsenergie sekundär zur Heizung des negativen Kraters beiträgt.

2b) Verlauf von Strom und Spannung. Dynamische Charakteristiken. Einen genaueren Aufschluß über die elektrischen Verhältnisse am Wechselstromlichtbogen erhält man, wenn man den zeit-

lichen Verlauf von Stromstärke und Klemmenspannung innerhalb jeder Wechselstromperiode ins Auge faßt (über die betreffenden Meßmethoden vgl. die Artikel „Strommessung“ und „Spannungsmessung“). Figur 24 zeigt ein typisches Oszillogramm dieses Verlaufs bei einem Kohlenlichtbogen. Man erkennt daraus, daß der Strom bei Ablauf jeder Halbperiode einen Moment Null wird, daß also der Lichtbogen dann erlischt, um zu Beginn der neuen Halbperiode im umgekehrten Sinne neu gezündet zu werden.

Die Spannung muß darum nach jeder Stromumkehr zunächst die „Zündspitze“ überklettern, ehe der Strom anwachsen kann. Sie sinkt dann auf einen nahezu konstanten Wert, den sie trotz der wechselnden Stromstärke beibehält, bis sie nach dem Ueberklettern eines zweiten niedrigeren Gipfels mit dem Verlöschen des Stromes auf Null herunterfällt. Im einzelnen wird diese typische Form mannigfach durch spezielle Versuchsbedingungen modifiziert. Figur 25 zeigt z. B., daß eine Vergrößerung der Bogenlänge ein rasches Erhöhen der Spitzen bedingt. Figur 26, daß eine Vergrößerung des Vorschaltwiderstandes, d. h. eine Verkleinerung der maximalen Stromstärke dieselbe Wirkung hat. Erhöhung der Frequenz

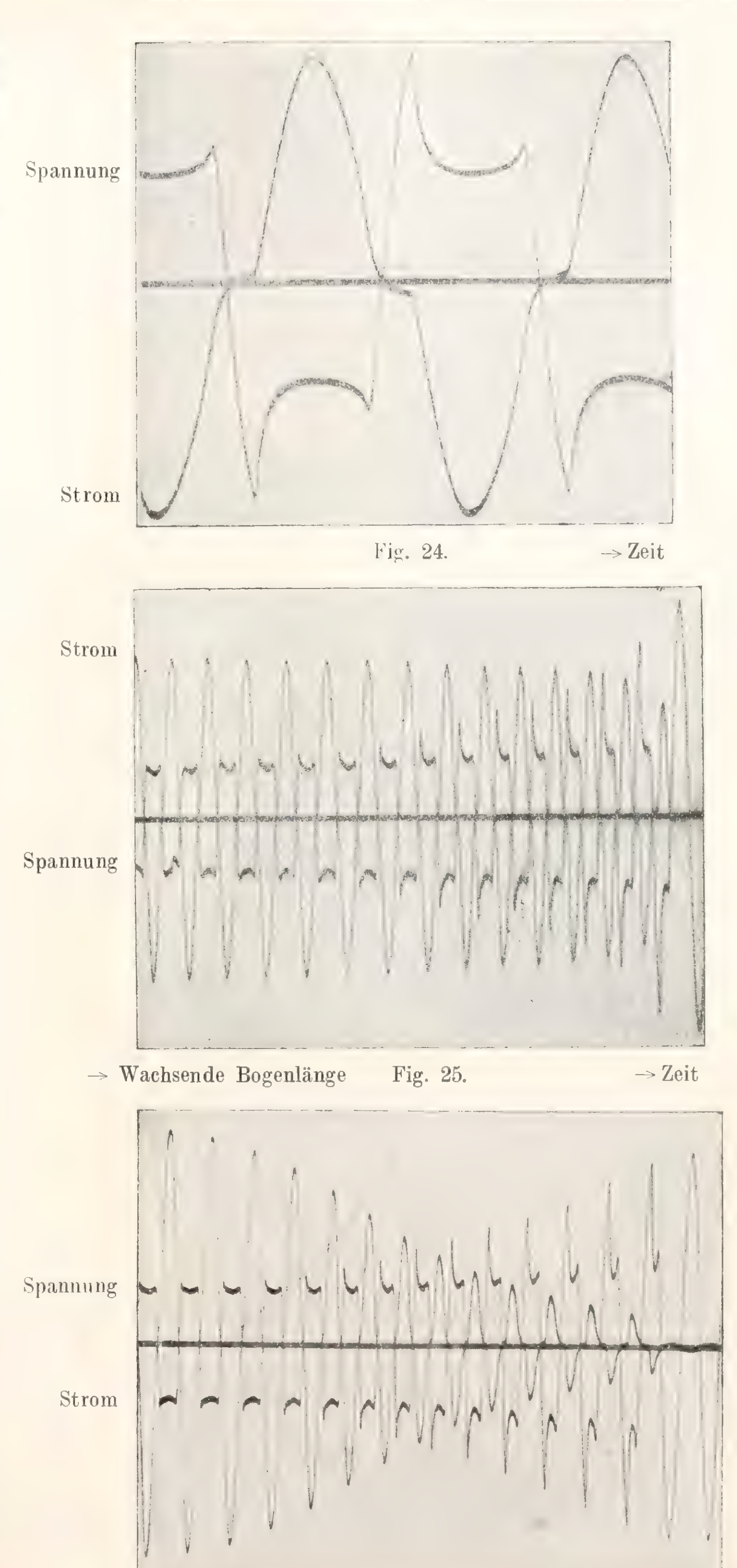


Fig. 24. → Zeit

→ Wachsende Bogenlänge Fig. 25. → Zeit

→ Wachsender Vorschaltwiderstand Fig. 26. → Zeit

andererseits drückt die Spitzen herunter, was die schon erwähnte Tatsache zum Ausdruck bringt, daß man einen Wechselbogen mit um so niedrigerer Spannung unterhalten kann, je höher die Frequenz ist. Schaltet man Selbstinduktionsspulen vor den Lichtbogen, so wird die Stromkurve mehr und mehr der Sinuskurve angenähert (Fig. 27),

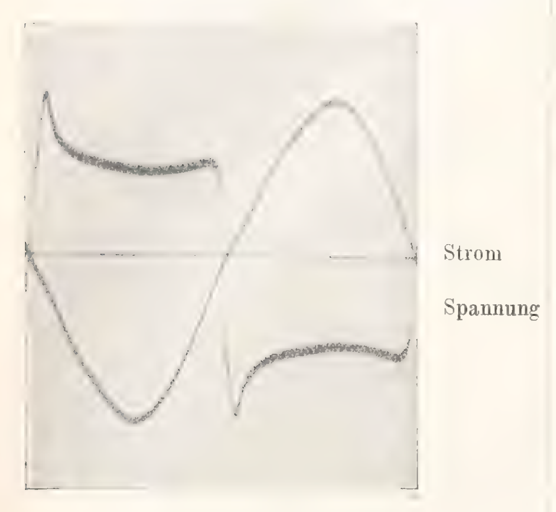


Fig. 27. → Zeit

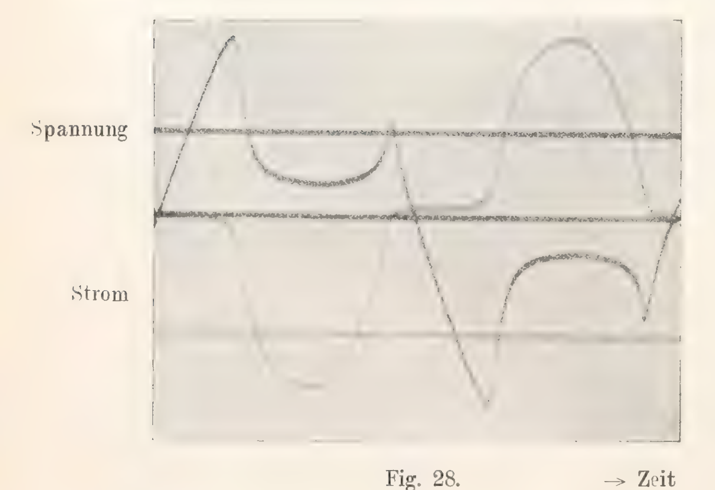


Fig. 28. → Zeit

die Zündspitze rückt näher an den Stromumkehrpunkt heran und wird auch erniedrigt. Ebenso wird die Auslöschspitze nach dem Umkehrpunkt hin verschoben, so daß der Bogen einen längeren Bruchteil der Halbperiode hindurch Bestand hat, als ohne Selbstinduktion. Salzgehalt der Elektroden drückt die Zündspitze herab, Abkühlung erhöht sie. Aus letzterem Grunde liegen die Zündspitzen bei Metallelektroden unter sonst gleichen Umständen so sehr viel höher, als bei Kohle, weil ihre Wärmeleitung etwa 37mal größer ist. Einbettung des Lichtbogens in verschiedene Gase hat die analoge

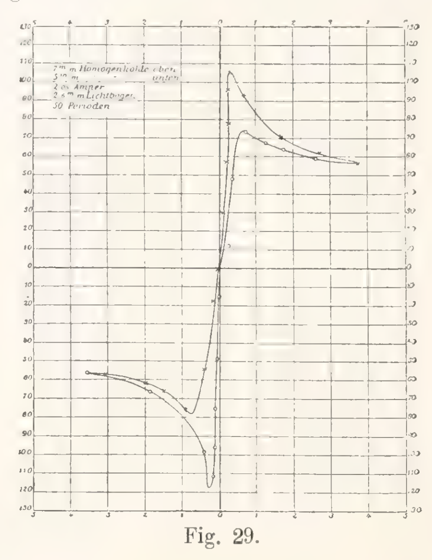


Fig. 29.

Wirkung wie beim Gleichstrombogen: Die Zündspitze sowohl wie der ganze Spannungsverlauf, endlich auch die Löschspitze werden z. B. durch Wasserstoffeinbettung erheblich erhöht (Fig. 28), woran zum Teil dessen hohe Wärmeleitung schuld sein dürfte. So auch beim Lichtbogen, der in seinen eigenen Gasen brennt.

Auch beim Wechsellichtbogen empfiehlt es sich, zusammengehörige Werte von Strom- und Klemmenspannung durch eine charakteristische Kurve graphisch darzustellen. Sie wird im Gegensatz zu der beim Gleichstrombogen erhaltenen „statischen" die „dynamische Charakteristik" genannt. Figur 29 zeigt die aus dem Oszillogramm Figur 24 erhaltene dynamische Charakteristik. Man sieht, daß die Stromvorgänge im Lichtbogen sich nicht auf der statischen Kurve vollziehen. Auch verläuft der ansteigende Strom auf einem anderen, höher liegenden Zweige, wie der absteigende. Der erstere führt über den Zündgipfel, der zweite rückwärts über einen Löschgipfel. An der dynamischen Charakteristik stellen sich die wichtigsten von den erwähnten Einflüssen der speziellen Versuchsbedingungen wie folgt dar:

Figur 30 zunehmende Bogenlänge
Figur 31 zunehmender Vorschaltwiderstand

Figur 32 zunehmende Schwingungszahl
Figur 33 Einfluß des umgebenden Gases.

Es ist oben schon ausgesprochen worden, daß die oszillatorischen Funkenentladungen von Kondensatorkreisen nichts anderes sind als Wechselstromlichtbogen sehr hoher Frequenz zwischen Metallelektroden, erzeugt von Wechselströmen zeitlich abnehmender Amplitude. Daß auch bei diesen Hochfrequenzlichtbogen dieselben elektrischen Verhältnisse obwalten, wie sie eben bei niederfrequenten Kohlenlichtbogen beschrieben wurden, hat Roschansky (1908) mit Hilfe der Braunschen Röhre gezeigt. Figur 34 zeigt den Spannungsverlauf, Figur 35 den entsprechenden Charakteristikenverlauf für Schwingungszahlen von der Größenordnung 100000/sec. an Zinkelektroden. Figur 36 ergänzt Figur 35 in bezug auf die Schwingungen der kleinen Stromamplituden, die in Figur 35 nicht zu erkennen sind. Es ist charakteristisch, daß die Spannung fast während der ganzen Halbperiode denselben Wert von 30 bis 40 Volt beibehält. Geht man zu höheren Schwingungszahlen (zwischen 150000 und 1000000), so erhält man Spannungskurven wie Figur 37 und Charakteristiken wie Figur 38; oberhalb 1000000 Spannungskurven wie Figur 39, Charakteristiken wie Figur 40. Die Spannungskurven nähern sich mit zunehmender Frequenz der Sinusform, die Charakteristiken Graden, die durch den Koordinatenanfangspunkt gehen. Während man also bei niedrigen Frequenzen nicht von einem konstanten Funkenwiderstand reden darf, stellen sich bei hohen Frequenzen wegen der Lichtbogenhysteresis Verhältnisse her, die den Lichtbogen als einen Leiter konstanten Widerstandes zu betrachten erlauben. In diesem Falle muß der Strom der Kondensatorschwingung nach einem Exponentialgesetz abklingen, während bei kleineren Schwingungszahlen andere Abklingungsgesetze auftreten müssen. In vielen Fällen nimmt die Stromamplitude linear mit der Zeit ab. Barkhausen hat 1908 gezeigt, daß das so sein muß, wenn man die Spannung wie im Falle der Figur 34 und 35 als von der Stromstärke unabhängig konstant ansehen darf (vgl. Fig. 11).

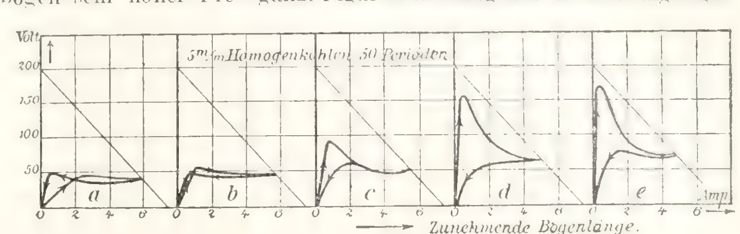


Fig. 30 (gemessen).

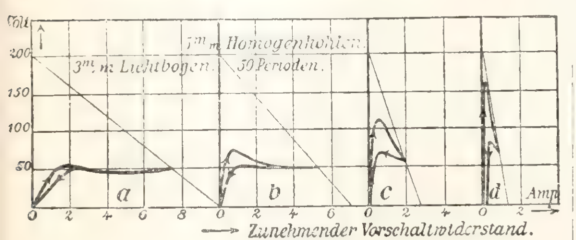


Fig. 31 (gemessen).

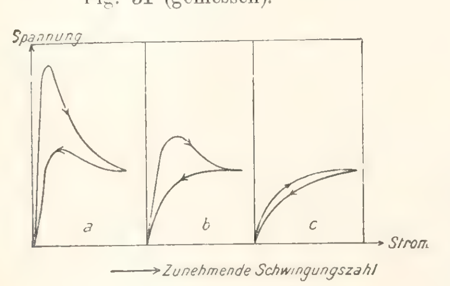
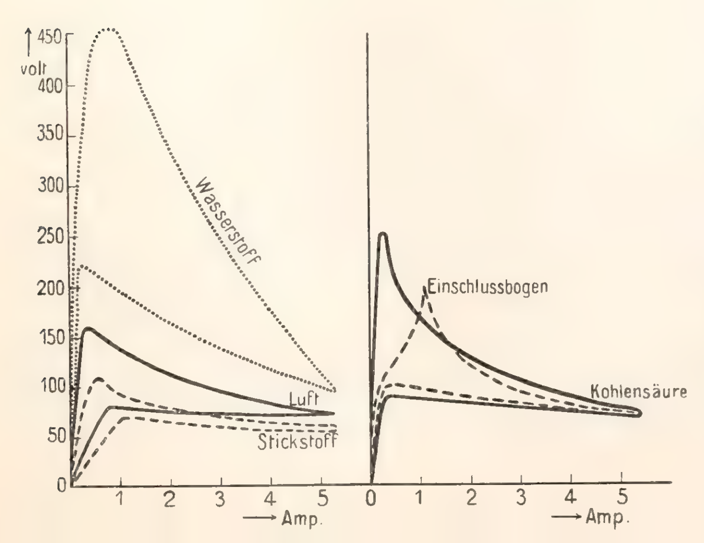


Fig. 32 (schematisch).



Die Gesamtheit der Abweichungen, welche die dynamischen Charakteristiken gegenüber den statischen aufweisen, bezeichnet man in Analcgie zu ähnlichen Vorgängen auf anderen Gebieten der Physik als Lichtbogenhysteresis (Simon 1904). Wie sich ihre scheinbare Kompliziertheit theoretisch übersehen läßt, wird Seite 231 ff. erörtert werden.

2c) **Unsymmetrischer Wechselstrombogen. Ventilwirkung.** Ist die Lichtbogenstrecke in bezug auf die Elektroden unsymmetrisch, so gelten für die beiden Halbperioden verschiedene Charakteristiken. Figur 41 zeigt z. B. die Charakteristik eines Wechsellichtbogens zwischen einer Kohlen- und einer Kupferelektrode. Sie ist aus dem Oszillogramm Figur 42 gewonnen. Man sieht, daß in diesem Falle der Strom in der Richtung, bei welcher das Kupfer negative Elektrode ist, vollständig unterdrückt wird. Ein solcher unsymmetrischer Lichtbogen wirkt also als elektrisches Ventil und kann zur Umwandlung von Wechselstrom in Gleichstrom dienen. Geringere Unsymmetrie besitzt ein Lichtbogen zwischen einer Docht- und einer Homogenkohle. Schon die Heizung einer Kohle durch aufsteigende Gase kann in geringem Grade Unsymmetrie bedingen. Es läßt sich alsdann, als Folge der Ventilwirkung, in dem Stromkreise ein über den Wechselstrom gelagerter Gleichstrom nachweisen.

2d) **Ueber einen Gleichstrom gelagerter Wechselstrom.** Durch einen Gleichstromlichtbogen geschickter Wechsel-

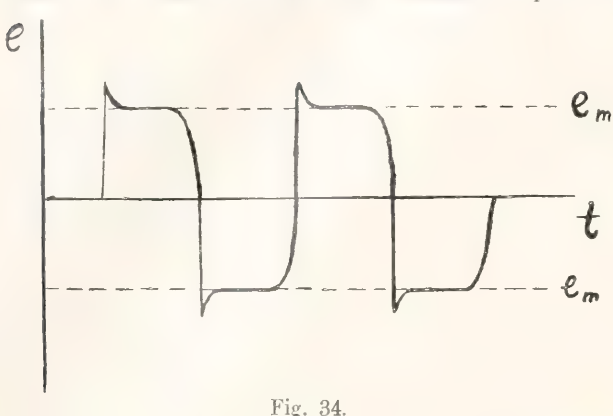


Fig. 34.

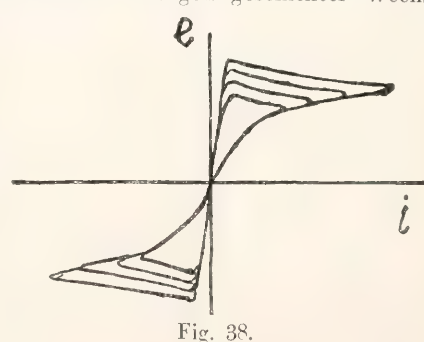


Fig. 38.

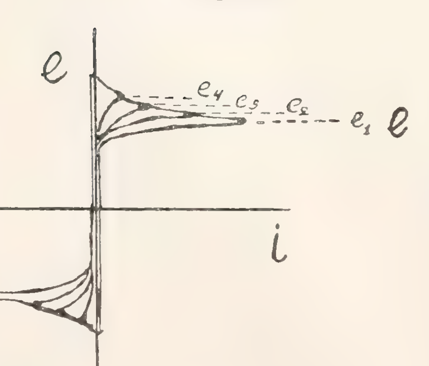


Fig. 35.

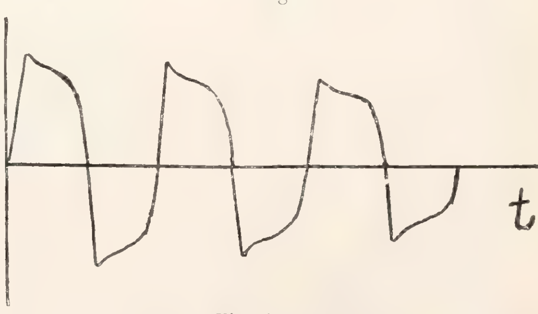


Fig. 36.

Fig. 39.

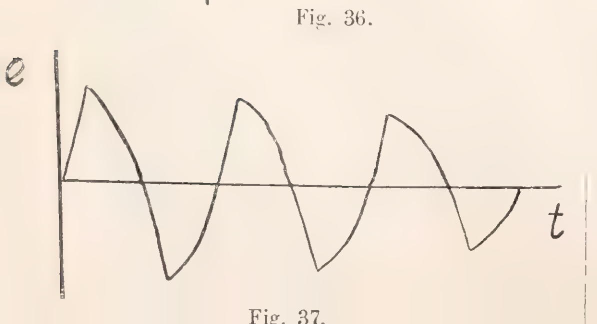


Fig. 37.

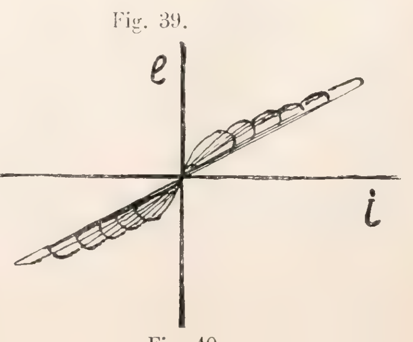


Fig. 40.

strom liefert Charakteristiken, wie sie in Figur 43 dargestellt sind: ellipsenähnliche Schleifen, die sich bei niedriger Frequenz des Wechselstroms der statischen Charak-

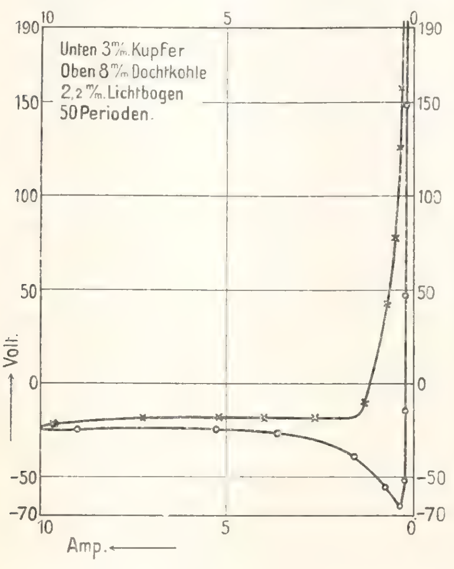


Fig. 41.

teristik anschmiegen, also mit ihrer großen Achse um so steiler stehen, je niedriger die Gleichstromstärke des Lichtbogens ist (siehe Fig. 43 a b c d). Mit zunehmender Frequenz dreht sich die Ellipse mehr und mehr, bis sie mit ihrer großen Achse in einer durch den Koordinatenanfangspunkt gehenden Geraden liegt (siehe Fig. 44). Für ganz hohe Frequenz des übergelagerten Wechselstromes verhält sich der Lichtbogen schließlich wie ein gewöhnlicher metallischer Leiter, dessen Charakteristik entsprechend dem Ohmschen Gesetz eine durch den Koordinatenanfangspunkt gehende Gerade darstellt. Je kleiner die Lichtbogenhysteresis des betreffenden Lichtbogens ist, desto höhere Frequenzen sind hierzu erforderlich.

2e) Zerhackter Gleichstrom. Oeffnet man den Strom eines Gleichstromlichtbogens und schließt ihn kurze Zeit darauf wieder, so beobachtet man folgendes: Wenn die Unterbrechungszeit nicht über einen bestimmten von der Bogenlänge abhängigen Wert ausgedehnt wird, entzündet sich der Licht-

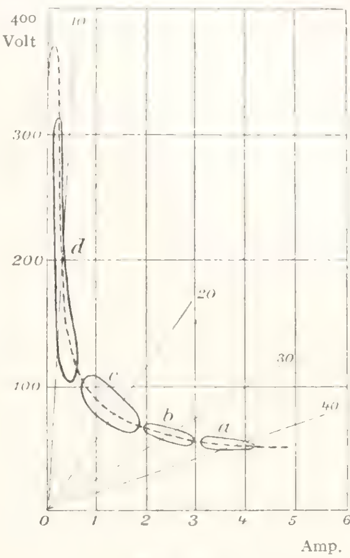


Fig. 43.

bogen sogleich wieder neu. Sobald der Lichtbogen erloschen ist, kühlen sich die Krater ab; dadurch wächst die Zündspitze der Charakteristik immer mehr in die Höhe. Erfolgt das Wiederanlegen der Spannung, solange die Zündspitze noch nicht über die

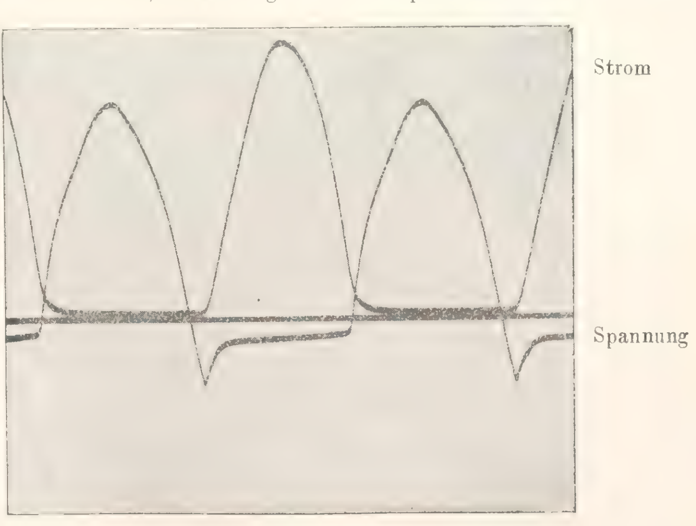


Fig. 42. → Zeit

Widerstandslinie hinausgewachsen ist, so entsteht der Lichtbogen wieder neu. Anderenfalls vermag die angelegte Spannung keine Wiederzündung zu veranlassen. Beim

Kohlenlichtbogen können bis dahin Bruchteile einer Sekunde vergehen, bei Metallichtbögen ist schon nach kaum meßbar kurzer Zeit ein Wiederanzünden unmöglich. Man erkennt, daß hier ganz ähnliche Verhältnisse walten, wie bei der Stromumkehr im Wechsel-

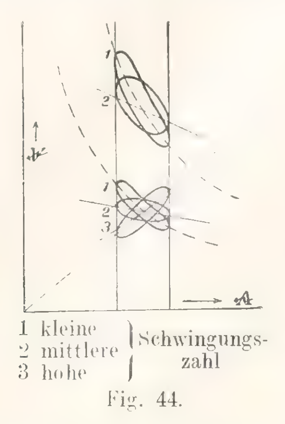


Fig. 44.

stromlichtbogen und versteht wieder, warum ein Metallichtbogen bei niedriger Wechselspannung nur mit hohen Frequenzen möglich ist.

Macht man den Unterbrechungsversuch mit einer Anordnung, bei der die eine Elektrode beweglich ist, so muß an dieser bei der Neuzündung die Kraterfläche neu gebildet werden. Solche Versuche sind z. B mit dem Figur 45 abgebildeten Apparate

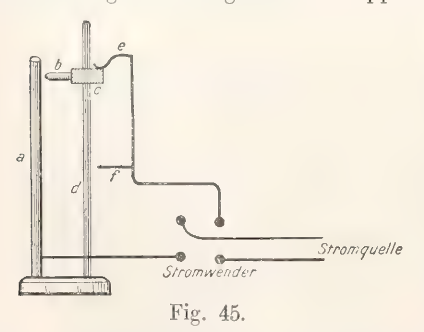


Fig. 45.

leicht durchzuführen Die Elektrode b kann an der Glasführung d herabgleiten, wobei während des Fallens die Spannung abgeschaltet ist. Man beobachtet dann, daß eine Neuzündung niemals möglich ist, wenn der Stab a negative Elektrode ist, also der negative Krater an einer kalten Stelle neugebildet werden muß; während eine Neuzündung erfolgt, wenn b negativ ist, wenn also der einmal gebildete negative Krater auch für die Neuzündung wieder benutzt wird. Dieser Versuch ist einer von denen, welche die entscheidende Rolle des negativen Kraters beweisen.

Schaltet man einem Lichtbogen plötzlich einen Kondensator parallel, so entzieht dieser ihm, indem er sich aufladet, für kurze Zeit Strom. Ist die Kapazität des Kondensators groß genug, so wirkt der Vorgang genau wie die eben beschriebene kurze Abschaltung der elektromotorischen Kraft. Nach dem Aufladen des Kondensators wird der Lichtbogen gewissermaßen neu gezündet. Je größer die Kapazität ist, desto länger dauert aber die Unterbrechung; bei genügend großer Kapazität muß daher der Lichtbogen dauernd verlöschen.

2f) **Selbsterregung von Wechselströmen durch den Gleichstromlichtbogen. Lichtbogenschwingungen erster, zweiter und dritter Art.** Enthält der parallel geschaltete Kondensatorkreis auch noch Selbstinduktion (siehe Fig. 46), so daß die Ladungsströme oszillierend werden (vgl. den Artikel „Elektrische Schwingungen"), so ist es möglich, daß dauernde elektrische Oszillationen auftreten (Duddell 1901). Sie äußern sich unter Umständen dadurch, daß der Lichtbogen einen dauernden Ton von einer Tonhöhe hören läßt, die der Periodenzahl der betreffenden Oszillation entspricht. Der Versuch bildet die völlige elektrische Analogie zu dem Anblasen einer Orgelpfeife durch einen stetigen Luftstrom. Denn wir haben dann in dem Lichtbogen eine dauernde Erregung elektrischer Schwingungen durch einen stetigen elektrischen Strom, einen automatischen Umformer von Gleichstromenergie in Wechselstromenergie. Daß der Lichtbogen diese Fähigkeit besitzt, beruht darauf, daß seine Charakteristik eine fallende ist: mit zunehmendem Strome sinkt die Klemmenspannung und umgekehrt. Legt man den schwingungsfähigen Kondensatorzweig an den Lichtbogen an, so strömt ein Teil des Stromes auf die Belegungen des Kondensators, die Stromstärke des Lichtbogens nimmt ab, und die Klemmenspannung nimmt zu. Da diese Klemmenspannung es ist, welche den Strom in den Kondensatorkreis hineintreibt, so wirkt ihre Zunahme so, als übe man noch einen besonderen Stoß auf die in den Kondensator fließende Elektrizität aus. Das Entsprechende tritt auf, wenn sich der Kondensator durch den Lichtbogen entladet. Der Lichtbogenstrom nimmt

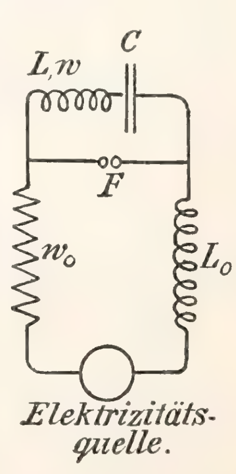


Fig. 46.

zu, seine Spannungsdifferenz ab, es wird dadurch gewissermaßen eine Saugwirkung auf die aus dem Kondensator kommende Elektrizität ausgeübt. Ohne diese vom Lichtbogen ausgeübten Stoß- und Saugwirkungen würde der Ladungsstrom des Kondensators in gedämpften Schwingungen abklingen. Durch sie wird, wenn sie groß genug sind, aus einer gedämpften Ladeschwingung die ungedämpfte Schwingung, die wir beobachten.

Die geschilderte Stoß- und Saugwirkung bildet in bezug auf den Kondensatorkreis eine wechselelektromotorische Kraft e', die sich über die Klemmenspannung e_0 des Gleichstrombogens überlagert. Am Lichtbogen herrscht also in jedem Moment eine Klemmenspannung $e = e_0 + e'$. Ebenso lagert sich über den Lichtbogenstrom i_0 ein Wechselstrom i', so daß der Momentanstrom $i = i_0 + i'$ fließt. i' ist der durch den Kondensatorkreis fließende Stromanteil des Lichtbogens. e' leistet im Lichtbogen mit dem Strome i' während einer Periode T die Arbeit $\int_0^T e'\,i'\,dt$. Es muß $\int_0^T e'\,i'\,dt < 0$ sein, wenn bei dem Vorgang Arbeit an dem Kondensatorkreis abgeliefert werden soll. Dort wird, wegen des Widerstandes w die Arbeit $\int_0^T i'^2\,w\,dt$ in Wärme verwandelt. Nur wenn diese Wärmeverluste durch die vom Lichtbogen abgebene Energie ersetzt werden, d. h. wenn

$$\int_0^T e'\,i'\,dt = \int_0^T i'^2\,w\,dt \quad .....17)$$

ist, kann die einmal eingeleitete Schwingung dauernd bestehen bleiben. $\int_0^T e'\,i'\,dt < 0$ bedeutet: wenn die Lichtbogenspannung e wächst, muß der Strom abnehmen, wie das ja gerade das Kennzeichen einer fallenden Leitercharakteristik ist. Von selbst entstehen können die Schwingungen nur, wenn für den betreffenden Lichtbogen $\int_0^T e'i'dt > \int_0^T i'^2 w dt$ ist. Sie müssen dann ihre Amplitude solange vergrößern, bis Gleichung 17 erfüllt ist. Dabei sind drei Fälle möglich: *α*) Die schließliche Schwingungsamplitude i'_{max} bleibt stets kleiner als i_0, dann wird der Lichtbogen niemals ganz verlöschen, sondern die Schwingung lagert sich als nahezu sinusförmiger Wechselstrom von der Schwingungszahl $n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ über den Gleichstrom i_0 (Schwingungen erster Art). Diese Schwingungen entstehen bei einem Kohlenlichtbogen, wenn er mit genügend großer Stromstärke betätigt wird. Die dynamischen Charakteristiken sind in diesem Falle so wie Seite 223 f. (Fig. 43 und 44) beschrieben. Wegen der Lichtbogenhysteresis läßt sich die Frequenz dieser Schwingungen nicht beliebig steigern. Denn wie dort gezeigt, geht wegen der Lichtbogenhysteresis die fallende Tendenz dieser Charakteristiken mit zunehmender Frequenz schließlich in steigende über. Daher kann oberhalb einer gewissen Frequenz der Bogen die Bedingung Gleichung 17) nicht mehr erfüllen.

β) Die Amplitude i'_{max} wächst über den Wert i_0 hinaus, so daß der Bogen zeitweilig verlöscht. Dieser Fall ist der häufigere. Schematisch sind die Vorgänge in Figur 47 dargestellt, oben der Strom im Lichtbogen, unten die Spannung am Lichtbogen und an dem Kondensator, wobei eine schematische Charakteristik von der in Figur 48 dargestellten Art geltend angenommen ist. Auch ist angenommen, daß durch Vorschalten einer großen Selbstinduktion L_0 vor den Lichtbogen die Stromstärke im äußeren Stromkreise stets konstant $= i_0$ bleibt. Ehe der Lichtbogen brennt, ladet sich der Kondensator mit der Stromstärke i_0, seine Spannung wächst in einer geraden Linie, bis bei B die Zündspannung E_z erreicht ist. Nun beginnt sich der Kondensator durch den Lichtbogen zu entladen, wobei an diesem die Spannung sogleich auf e_0 heruntersinkt. Bis der Strom im Lichtbogen $= i_0$ geworden ist, fließt noch ein Teil in den Kondensator, der darum

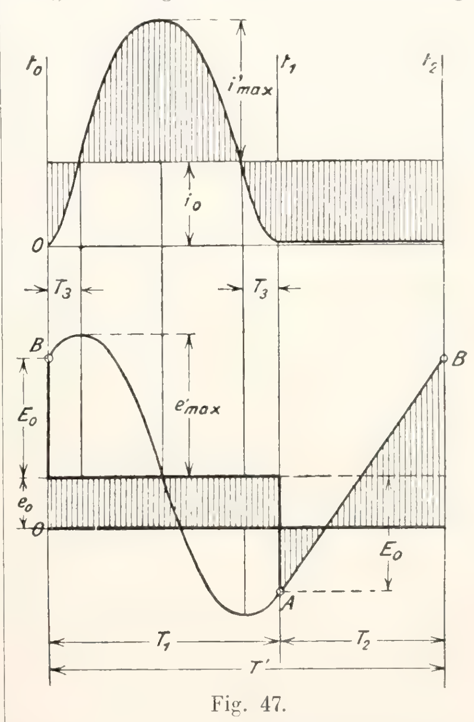


Fig. 47.

seine Spannung bis dahin noch vergrößert. Strom und Kondensatorspannung verlaufen sinusförmig, die Klemmenspannung am Lichtbogen bleibt auf dem Wert e_0, bis $i = 0$ wird und der Bogen erlöscht. Von nun an liegt am Bogen die Kondensatorspannung, welche zunächst negativ ist und das Streben hat, im umgekehrten Sinne einen Lichtbogen zurückzutreiben. Solange die Zündspitze

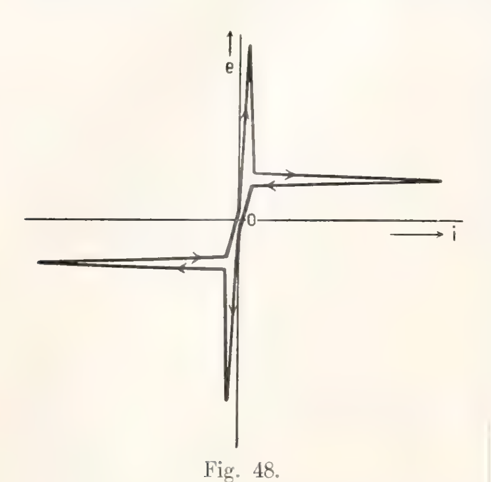


Fig. 48.

der für diesen Lichtbogen maßgebenden Charakteristik nicht von der umgekehrten Kondensatorspannung erreicht wird, kann keine solche Rückzündung erfolgen. Alsdann ladet sich der Kondensator wieder auf der geraden Linie auf bis zur Zündspannung E_z, und das Spiel beginnt von neuem (Schwingungen zweiter Art). Man sieht, daß der Kondensatorstrom jetzt von der Sinusform erheblich abweicht und mehr als eine Reihe von Stromstößen zu bezeichnen ist, die von stromlosen Pausen T_2 unterbrochen sind. Dabei müssen die Pausen T_2 einerseits mit abnehmendem Strome i_0, d. h. mit zunehmendem Vorschaltwiderstand w_0, andererseits mit der Höhe der Zündspannung E_z, d. h. mit zunehmender Bogenlänge wachsen. In Wirklichkeit kompliziert die Lichtbogenhysteresis die Erscheinungen insofern, als sie bewirkt, daß E_z selbst von der Länge der Pause T_2 abhängig wird. Je größer sie nämlich ist, desto langsamer wächst nach dem Verlöschen des Lichtbogens die Zündspitze in die Höhe (infolge der Abkühlung). Da hier der Fall der Spannung von E_z auf e_0 den Impuls der Schwingung liefert, so sieht man ein, daß auch hier die erreichbare Frequenz der Oszillationen nach oben um so mehr begrenzt ist, je größer die Lichtbogenhysteresis ist. Alle Mittel, welche sie verringern, erhöhen auch hier die erreichbare Frequenz.

γ) Es kann nun aber auch der Fall eintreten, daß beim Verlöschen des Lichtbogens (Punkt A) die Rückzündung in der Tat eintritt (Schwingungen dritter Art). Und zwar gibt es für jede Stromstärke i_0 und jede Frequenz einen Wert von $\varrho = \sqrt{\frac{L}{C}}$, der nicht unter eine bestimmte Grenze herabgesetzt werden darf, ohne daß die Schwingungen zweiter Art in Schwingungen dritter Art übergehen. Dieses ist der Fall der gewöhnlichen oscillatorischen Funkenentladung; bei ihr wird die Zündspitze der Charakteristik lediglich benutzt, um die Eigenschwingung des Kondensatorkreises anzustoßen. Infolge der Lichtbogenhysteresis gilt nach der Zündung eine Charakteristik wie Figur 49 (ausgezogene Kurve), und die Schwingungen können bis zu niedrigen Spannungswerten herab die Lichtbogenbahn ungestört passieren. Danach wird die Strecke wieder nichtleitend, und der Kondensator muß sich aufs neue bis zur Zündspannung laden.

Man kann übrigens das Rückzünden erschweren, indem man eine unsymmetrische

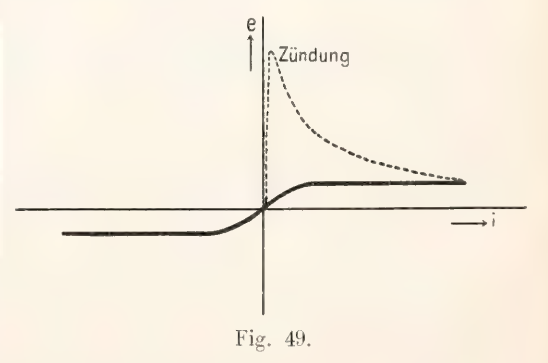


Fig. 49.

Lichtbogenstrecke verwendet, so daß die Elektrode, welche die höhere Zündspannung besitzt, für die Rückzündung in Frage kommt. So hat sich z. B. die Kombination einer positiven Kupferelektrode mit einer negativen Kohlenelektrode gut bewährt, um das Rückzünden zu vermeiden und Schwingungen zweiter Art höherer Frequenz zu erhalten. Wenn übrigens $\varrho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ bei gegebenem i_0 über einen bestimmten Betrag steigt, so entstehen überhaupt keine Schwingungen mehr, der Funke wird dann, wie man sagt, inaktiv, weil dann die Aufladung des Kondensators so schnell erfolgt, daß keine Zeit zur Ausbildung einer Zündspannung bleibt. Dann fällt der Impuls zum Auftreten der Schwingungen weg.

Sowohl bei den Schwingungen zweiter als auch dritter Art steigert Erhöhung von E_z die Energie der Schwingungen, darum

bedeutet Verminderung der Lichtbogenhysteresis stets auch eine Steigerung der Schwingungsenergie. Figur 50 stellt übersichtlich für alle drei Schwingungsarten den Verlauf für Strom und Klemmenspannung am Lichtbogen in oszillographischen Aufnahmen dar.

B 3. Die Wärmeentwickelung im Wechselstromlichtbogen. Die Sitze der weitaus stärksten Wärmeentwickelung sind auch hier die beiden Krater; sie verhalten sich auch in bezug auf die Wärmeentwickelung völlig symmetrisch. Ueber die Variationen, denen Kratergröße und Kratertemperatur bei wechselnder Stromstärke unterliegen, hat M. Reich Messungen angestellt: Er fand, daß der Kraterradius r bei Stromänderungen stets hinter dem statischen Werte zurückbleibt, d. h. dem Werte, den man nach dem für stationäre Gleichstrombogen gültigen Gesetz $r = m + ni$ (Gl. 7) berechnet. Figur 51 zeigt das. Läßt man den Strom plötzlich ansteigen (siehe Fig. 52), so steigt die Kratergröße langsam auf den statischen Wert. Bis er erreicht ist, erhöht sich die Kratertemperatur. Man kann sich das so erklären, daß die Stromerhöhung zunächst die innersten, von der heißesten Kraterstelle ausgehenden Stromfäden ergreift, daß sich danach langsam die dem neuen Strome entsprechende Verteilung herstellt, wobei die Temperatur auf den durch die Theorie anschaulich gemachten Grenzwert zurückgehen muß. Figur 53 zeigt den umgekehrten Fall eines schnellen Stromabfalles. Figur 54 zeigt, wie die Verhältnisse sich im Falle eines pulsierenden Gleichstromes darstellen.

Es ist aus alledem wohl zu verstehen, warum beim Wechselstrombogen die Krater keine scharf begrenzten, einer genaueren Größenbestimmung zugänglichen Flächen bilden.

Die Temperatur des Wechselstromlichtbogens selbst scheint den Schwankungen der Stromstärke ohne meßbare Verzögerung zu folgen.

B 4. Die Lichtentwickelung im Wechselstromlichtbogen. Entsprechend der bei ihm herrschenden Symmetrie der beiden Elektroden ergibt der Wechselstrombogen eine symmetrische Lichtverteilungskurve, wie sie Figur 55 dargestellt ist. Die mittlere sphärische Lichtstärke steigt mit wachsender Bogenlänge (bei konstanter Stromstärke) zuerst bis auf einen Maximalwert, um dann

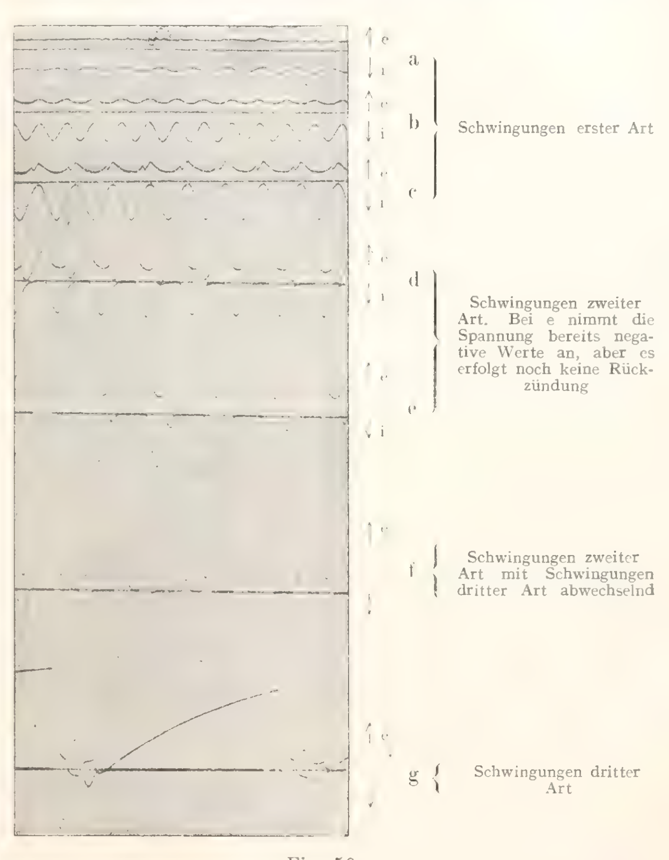


Fig. 50.

In allen Fällen war $C = 14{,}03$ Mikrofarad und $L = 0{,}023$ Henry. L_0 ziemlich groß. a) b) c) sind Schwingungen erster Art. Die größere Amplitude von c) ist durch eine geringe Steigerung der Bogenlänge l erreicht. d) und e) sind Schwingungen zweiter Art. i ist wesentlich kleiner als bei b) und c), und außerdem ist die Bogenlänge l größer. Die geringe Steigerung der Bogenlänge in e) bewirkt größere Unterbrechungszeiten, höhere Zündspannungen und größere Amplituden, e wird hier schon negativ. In f) wird durch Abnahme von i_0 und weitere Steigerung von l ein Zustand geschaffen, bei dem gelegentlich schon Rückzündung erfolgt. In g) ist durch sehr kleines i_0 die Schwingung dritter Art erreicht. l muß sehr klein sein, sonst vermag die zur Verfügung stehende Spannung E nicht die Zündung zu bewirken.

wieder zu fallen. Die Ursache ist, daß die Schattenwirkung der Elektroden zunächst verringert wird, so daß die entsprechende

Lichtzunahme die Lichtabnahme wegen der Bogenverlängerung überdeckt. Aus gleichem Grunde verringert Vergrößerung des Kohlendurchmessers die Lichtausstrahlung.

Da das Licht des Wechselbogens, entsprechend den S. 227 unter 3 geschilderten

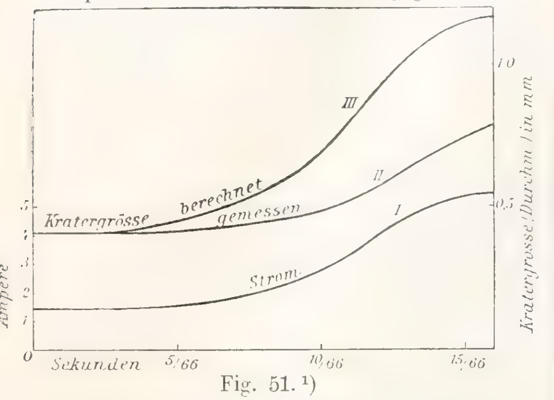


Fig. 51.[1])

Schwankungen der Temperatur und Kratergröße innerhalb einer Periode zweimal auf und abflutet, so erregt es ein Flimmern im Auge, wenn nicht die Wechselzahl des Lichtes höher als 60 in der Sekunde ist. Aus diesem Grunde hat man die Schwingungszahl des für Beleuchtungszwecke dienenden Wechselstroms auf 50/sec. = 100 Lichtwechsel festgelegt. Man hat übrigens photographisch nachgewiesen, daß auch noch 400 Stromwechsel/sec. über

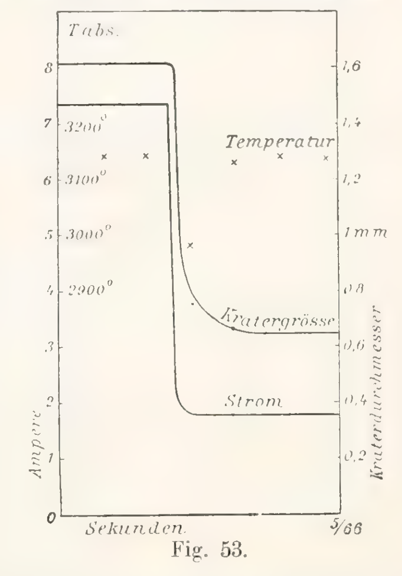


Fig. 53.

einen Gleichstrom gelagert deutliche Lichtschwankungen bewirken, wenn die Wechselstromamplitude mehr als 3 % des Gleichstroms beträgt. Hierauf beruht die Verwendung des sprechenden Lichtbogens als Sender bei der Bellschen Lichttelephonie (Simon 1899), sowie der Ruhmersche Lichtphonograph (siehe C 3e).

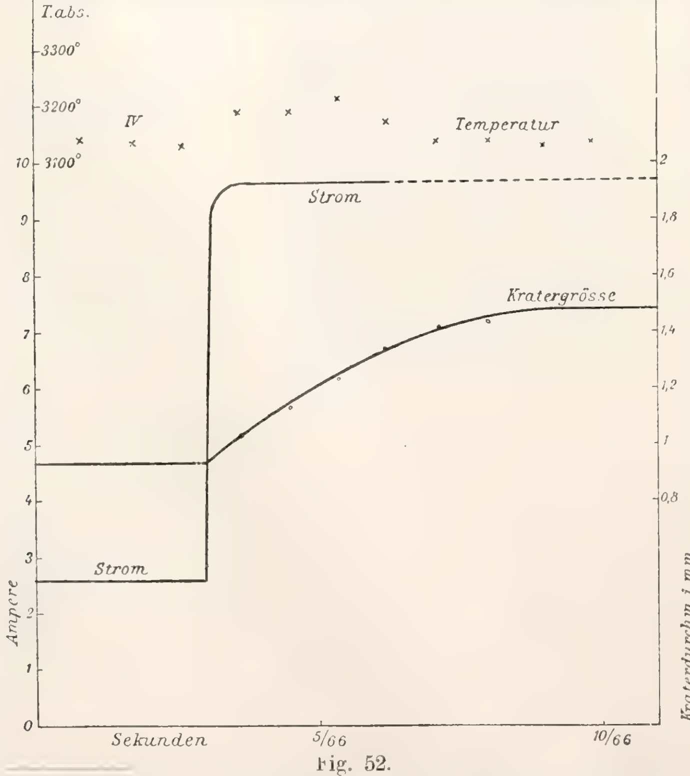


Fig. 52.

Wie die Lichtaussendung des Bogens allein innerhalb jeder Periode mit den Momentanwerten von Strom, Spannung und Leistung zusammenhängt, zeigt Figur 56. Daß sie beim Bogen nie Null zu werden scheint, obwohl er doch bei der Stromumkehr erlischt, wird wohl darauf beruhen, daß man das Kraterlicht bei den Versuchen doch nicht völlig absperren konnte. Figur 57 zeigt den zeitlichen Verlauf der Lichtausstrahlung eines Kraters. Das Seite 327 unten hervorgehobene Nachhinken der Kratertemperatur oder der

[1]) Figur 51 bis 54 sind dem Werke von M. Reich, Größe und Temperatur des negativen Lichtbogenkraters entnommen.

Kratergröße zeigt sich auch in der Lichtausstrahlung deutlich ausgeprägt. Die Kurven steigen steiler an, als sie fallen.

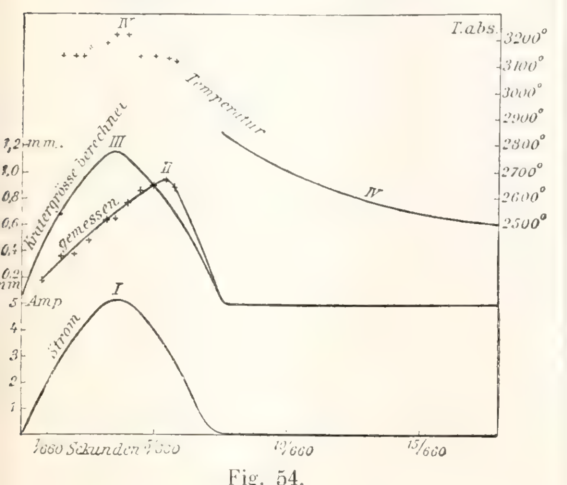


Fig. 54.

Wegen der zu den Zeiten der Stromumkehr so viel kleineren Lichtaussendung ist die spezifische Lichtausbeute beim Wechselstrombogen erheblich kleiner wie beim Gleichstrom und zwar um 50 bis 100%. Sie ist beim Gleichstrombogen z. B. zu 0,76 HK/Watt, bei Wechselstrom zu 0,53 HK/Watt gefunden worden. Die Lichtausbeute muß entsprechend den Figuren 24 bis 28 gegebenen Diagrammen beim Wechselstrombogen von der Kurve der verwendeten Wechselspannung abhängen. Bei flachen Kurven ist sie größer, wie bei spitzen. Ebenso erhöht Vorschaltung einer Selstinduktion die Lichtausbeute, weil sie die Zeit der Stromunterbrechung abkürzt (vgl. Fig. 27).

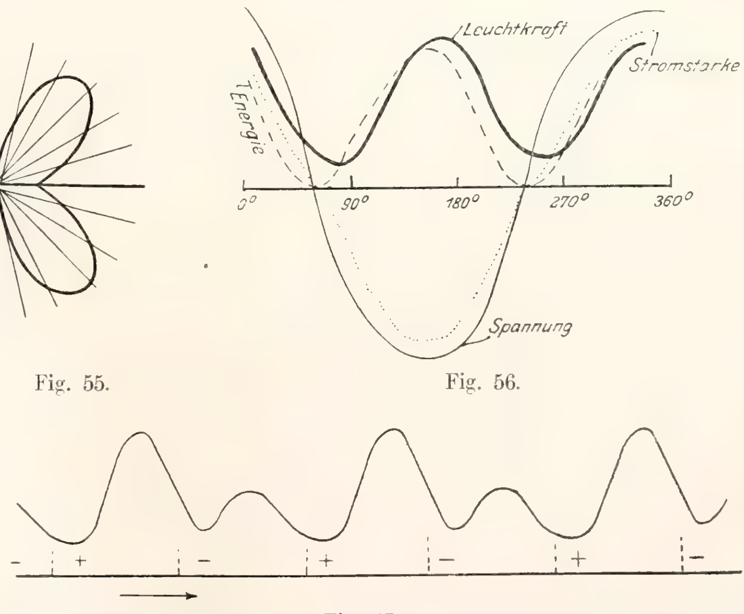


Fig. 55. Fig. 56.

Fig. 57.

B5. Theorie des Wechselstromlichtbogens. 5a) Allgemeiner Ansatz. Eine Theorie der Wechselstromvorgänge im Lichtbogen ist von H. Th. Simon 1904 gegeben worden. Entsprechend der entwickelten Ionentheorie des Lichtbogens führt sie das Produkt S = TF aus Temperatur T und Fläche F des negativen Kraters als die für einen Lichtbogen wesentliche Größe ein und geht von folgender Ueberlegung aus: wenn zwangsweise an der Kathode das Produkt TF auf einem bestimmten Werte festgehalten werden könnte, würde — so wird angenommen — der Lichtbogen sich wie ein gewöhnlicher Leiter verhalten und einen konstanten Widerstand besitzen. Dieser Widerstand muß mit zunehmendem TF mehr und mehr abnehmen. In der Darstellung der Charakteristiken: der Lichtbogen mit konstantem TF soll als Charakteristik eine durch den Koordinatenanfangspunkt gehende Gerade haben, deren Steigung gegen die i = Achse durch den festgehaltenen Wert von TF bestimmt ist (TF = Strahlen).

In Wirklichkeit ist aber, wenn man eine Gleichstromlichtbogen einleitet, TF nicht konstant zu halten, sondern wird durch die an der Kathode entwickelte Stromwärme selbst so lange vergrößert, bis ein Gleichgewicht zwischen der Wärmezufuhr und den Wärmeverlusten besteht. Von der gesamten, im Lichtbogen abgegebenen Stromwärme ei entfällt ein von den näheren Versuchsbedingungen abhängiger Betrag σei auf die Heizung des Kathodenkraters. Falls dort sekundäre Wärmezufuhr ausgeschlossen

ist, die Stromenergie selbst also die ganze Zufuhr deckt, ergibt sich demnach für das Wärmegleichgewicht die Beziehung

$$\sigma ei = CTF \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 18)$$

da wesentlich die Wärmeverluste durch Wärmeleitung in Frage kommen, die TF proportional sind. σ wird für sehr kleine Bogenlänge $= \frac{1}{2}$, da dann je die Hälfte von ei zur Heizung jedes Kraters verwendet wird. So ergibt sich

$$ei = WTF \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 19)$$

wo $W = \frac{C}{\sigma}$ gesetzt ist.

Durch diese Beziehung wird, falls die statische Charakteristik gegeben ist, jeder Lichtbogenleistung ein mit einem be-

$$ei = 40 + 46\, i \quad \text{(vgl. A 2 a).}$$

Die Zündspitze, die ja von der Ayrtonschen Beziehung nicht mitumfaßt wird, ist nach einer Schätzung ergänzt. Wird W vergrößert, so rückt die Charakteristik zu höheren Spannungswerten. Das kann ebensowohl durch Vergrößerung der Wärmeableitung C geschehen, wie durch Verkleinerung des zur Heizung des Kraters dienenden Bruchteils σ von ei. Dieser Bruchteil hängt von l ab. Ist σ_l der Bruchteil für die Bogenlänge l, σ_0 für $l = 0$, so kann man aus Gleichung 6 für eine bestimmte Stromstärke setzen

$$\sigma_l \; ei = \sigma_l \; (A + Bl)$$

Da für $l = 0$, $\sigma_0 = \frac{1}{2}$ werden soll, ist $\sigma_0 ei = \frac{1}{2}$ A.

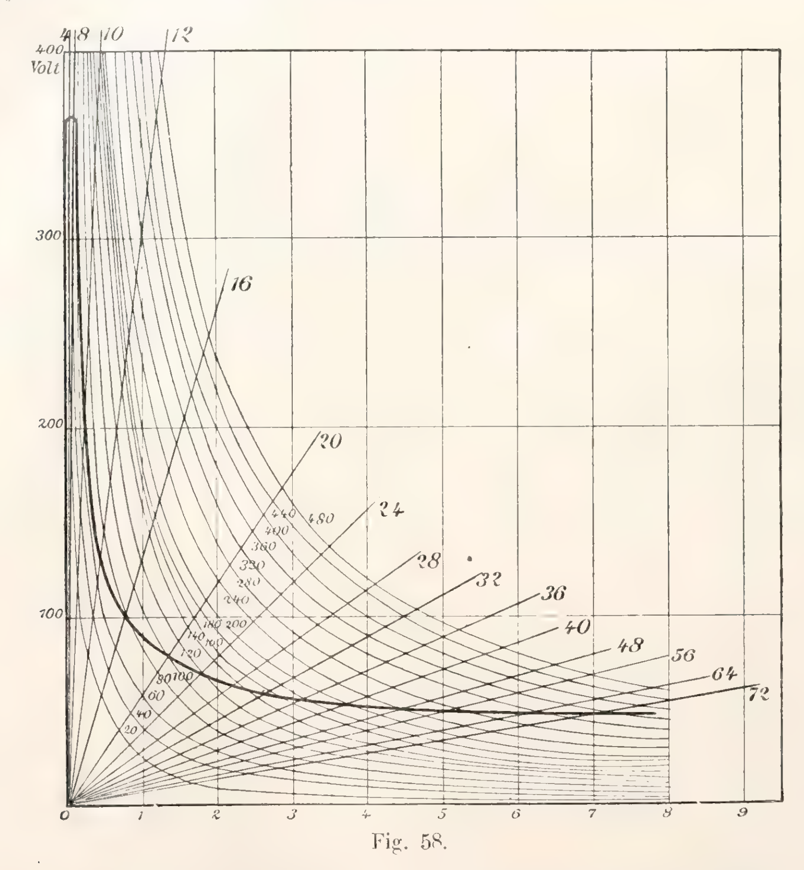


Fig. 58.

stimmten Zahlenwert behafteter TF-Strahl zugeordnet, sobald man ein einziges zusammengehöriges Wertepaar kennt. Für einen Lichtbogen von 1 mm Länge zwischen Homogenkohlen ist in Figur 58 angenommen, daß für ei = 100 (Lichtbogen von 1,3 Ampere) TF den Wert 20 habe, was einer Fläche von 0,005 qcm mit 4000° entspräche. Für W ergibt sich so der Wert W = 5. Nach den Ayrtonschen Messungen gilt für einen solchen Bogen

Um ein bestimmtes TF zu erzielen muß unabhängig von der Bogenlänge stets die gleiche Energie aufgewendet werden; also wird

$$\sigma_l \; (A + Bl) = \tfrac{1}{2} A$$

und

$$\sigma_l = \frac{A}{2\,(A + Bl)} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 20)$$

d. h., konstante Stromstärke vorausgesetzt, wird mit zunehmender Bogenlänge ein

immer kleinerer Bruchteil der Lichtbogenleistung zur Heizung des negativen Kraters benutzt. Daraus folgt, daß mit zunehmender Bogenlänge die Charakteristik zu immer höheren Spannungswerten rückt. Setzt man für A und B die Werte aus Gleichung 6 ein, so wird

$$\sigma_l = \frac{\alpha + \gamma i}{2(\alpha + \gamma i + \beta l + \delta l i)} \quad . \quad . \quad 21)$$

Mit Hilfe dieser Gleichung und der Gleichung 18 σ_l ei = C T F läßt sich jede Charakteristik nach dem durch Gleichung 2 definierten graphischen Verfahren konstruierten, sobald eine einzige mit ihren TF-Strahlen bekannt ist.

Für veränderliche Vorgänge im Lichtbogen ergibt sich jetzt folgendes: Wenn ein bestimmtes TF des negativen Kraters stationär vorhanden ist, so herrscht in seiner die Wärme ableitenden Umgebung eine bestimmte Wärmeverteilung: in jedes Volumenelement strömt ebensoviel Wärme ein wie aus, und in jedem Volumenelement ist eine bestimmte Wärmemenge enthalten. Wird nun die Wärmezufuhr vergrößert, so wächst die in jedes Volumenelement einströmende Wärmemenge, während zunächst die ausströmende dieselbe bleibt. Somit speichert sich mehr Wärme in dem Element auf und vergrößert das Temperaturgefälle, bis wieder die ausströmende Wärme gleich ist der einströmenden. Ist dieses neue Gleichgewicht erreicht, so ist der Wärmeinhalt jedes Volumenelements vergrößert worden, somit auch der gesamte Wärmegehalt des Wärmestromes. Ehe also eine Vergrößerung von TF möglich ist, muß die vergrößerte Wärmezufuhr jene Vermehrung des Wärmeinhaltes Q decken.

Dieser Wärmeinhalt Q des Wärmeableitungsstromes ist um so größer, je größer TF, je größer die Dichte ϱ und die spezifische Wärme c des wärmeleitenden Materials, und je kleiner seine Wärmeleitung λ ist, also

$$Q = \frac{TF \varrho c}{\lambda} = \Lambda TF \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 22)$$

wo Λ den Wärmeinhalt für TF = 1 bedeutet.

Wird Q in der Zeit dt um dQ verändert, so ist die pro Zeiteinheit dafür erforderliche Wärmemenge $\frac{dQ}{dt} = \frac{d\,(TF)}{dt}$. Sie ist positiv, d. h. muß zugeführt werden, wenn die Wärmezufuhr wächst, negativ, d. h. sie wird abgegeben, wenn die Wärmezufuhr kleiner wird.

Im nichtstationären Zustande hat die dem Krater pro Sekunde zugeführte Wärme σei außer dem Wärmeverluste noch diese Wärmemenge $\Lambda \frac{d\,(TF)}{dt}$ zu leisten, also gilt für veränderliche Vorgänge

$$\sigma ei = CTF + \Lambda \frac{d\,(TF)}{dt}, \text{ oder}$$

$$ei = WTF + L \frac{d\,(TF)}{dt}, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 23)$$

wenn W wieder $= \frac{C}{\sigma}$, $L = \frac{\Lambda}{\sigma}$ gesetzt wird.

Diese Beziehung gestattet zu einem gegebenen zeitlichen Verlauf von ei den Verlauf von TF zu berechnen. In dem in Figur 58 dargestellten Diagramm ($\sigma = 1$) erhält man alsdann die für den betreffenden Fall gültige dynamische Charakteristik, wenn man die Schnittpunkte der auf gleiche Zeitmomente bezogenen Leistungshyperbeln und TF-Strahlen durch eine Kurve verbindet.

5 b) Der Wechselstromlichtbogen. Die Vorgänge am Wechselstromlichtbogen erhalten wir aus dieser allgemeinen Theorie in erster Annäherung, wenn wir in unsere Differentialgleichung $ei = e_0 i_0 \sin^2 \omega t$ einsetzen. Die Integration der Differentialgleichung

$$e_0 i_0 \sin^2 \omega t = \frac{1}{2} e_0 i_0 (1 - \cos 2 \omega t)$$

$$= WTF + L \frac{d\,(TF)}{dt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 24)$$

ergibt schließlich

$$TF = \frac{T_0 F_0}{2} \left\{ 1 - \frac{W}{\sqrt{W^2 + (2 \omega L)^2}} \sin(2 \omega t + \varphi) \right\} + C \varepsilon^{-\frac{W}{L} t} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 25)$$

wo φ durch $\operatorname{tg} \varphi = \frac{2 \omega L}{W}$ definiert ist.

Das heißt, zwingt man einer Lichtbogenstrecke eine Leistung $ei = e_0 i_0 \sin^2 \omega t$ auf, so verläuft schließlich, wenn das Glied $C \varepsilon^{-\frac{W}{L} t} = 0$ geworden ist, TF sinusförmig mit der Periode 2ω um den Wert $\frac{T_0 F_0}{2}$, mit einer Phasenverschiebung gegen ei und einer Amplitude, die durch W, L und ω bestimmt sind. $T_0 F_0$ ist der Wert von TF für den Fall, daß $e_0 i_0$ als Gleichstromleistung zugeführt würde.

Berechnet man für bestimmte numerisch definierte Fälle die Werte TF und aus

$$ei = e_0 i_0 \sin^2 \omega t$$

zu denselben Zeiten t die zugehörigen Werte ei, so definieren die Schnittpunkte der zusammengehörigen Leistungshyperbeln und TF-Strahlen die dynamischen Kurven.

Die Figuren 59 und 60 enthalten das Resultat einer solchen Berechnung und Konstruktion unter Zugrundelegung der Figur 58 dargestellten statischen Charakteristik.

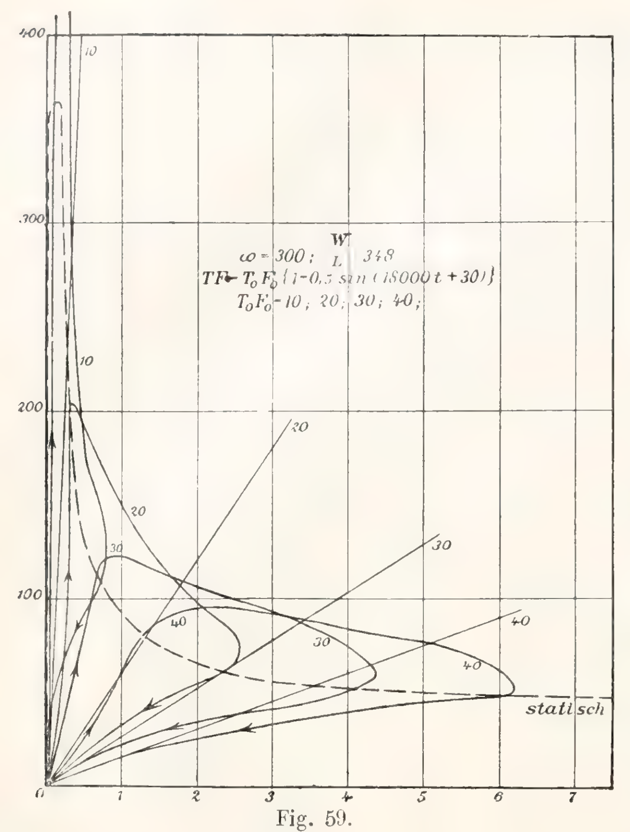


Fig. 59.

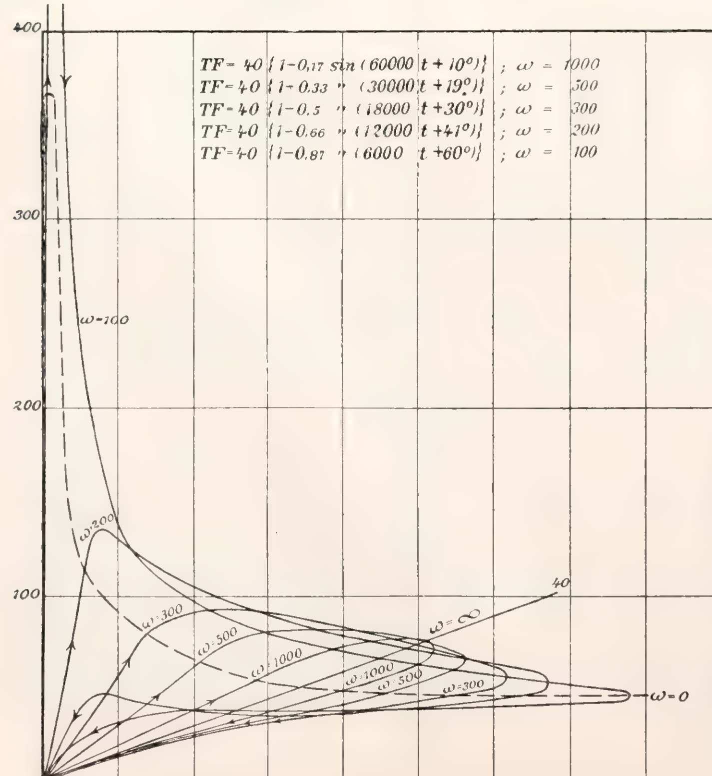


Fig. 60.

Es ergeben sich Kurven von genau dem Typus, wie sie durch den Versuch Abschnitt **2** b gewonnen wurden. Insbesondere ergibt sich die Lichtbogenhysterese in der Weise, wie die Versuche gezeigt haben.

Die Variation von T_0F_0 in Figur 59 entspricht dem Falle der Figur 31, wo durch Variation des Vorschaltwiderstandes die maximale Stromstärke verändert wurde. Man sieht, daß die Theorie genau mit den Ergebnissen des Versuches übereinstimmt. Die Spannungsmaxima liegen um so höher, und rücken zu um so niedrigeren Stromstärken, je niedriger die maximale Stromstärke gewählt wird. Der einsetzende Strom jeder Halbperiode findet eben um so höhere TF-Werte noch vor, je höhere vorher vorhanden waren.

Gleichzeitig nimmt, genau wie beobachtet, die Lichtbogenhysterese zu, d. h. der Unterschied der maximalen Spannungen im steigenden und fallenden Aste nimmt schnell zu, wie das bei den oscillographischen Spannungskurven (Fig. 26) an den Spitzen sichtbar ist. Man erkennt hier, warum ein Wechselstromlichtbogen erst bei bestimmten Werten der Stromstärke möglich wird, warum also bei Vergrößerung des Vorschaltwiderstandes der Lichtbogen schließlich erlischt.

Die Stromstärke, die mindestens erreicht werden muß, um den Wechselstromlichtbogen zu ermöglichen, ist unter sonst gleichen Bedingungen um so größer, je größer $\frac{W}{L}$. Je schlechter also die Elektroden die Wärme ableiten, desto leichter kommt ein Wechselstromlichtbogen zustande.

Der Einfluß einer Variation von ω ist in Figur 60 dar-

gestellt. Man sieht wieder in genauer Uebereinstimmung mit den Versuchen, daß das Spannungsmaximum mit abnehmender Frequenz größer und größer wird und bei immer kleineren Stromstärken liegt. Die extremen Fälle sind $\omega = 0$ (statische Charakteristik) und $\omega = \infty$. Im letzteren Falle behält der Lichtbogen dauernd den Wert T_0F_0, d. h. der negative Krater folgt den Stromschwankungen nicht mehr. Zu jeder Betriebswechselspannung gehört eine bestimmte Mindestfrequenz, unterhalb deren sie den Lichtbogen nicht zu unterhalten vermag. Je höher die Spannung ist, desto kleiner ist die Frequenz, die noch den Lichtbogen ermöglicht. Verkleinert man ω, so muß der Wechselstromlichtbogen bei einer bestimmten Frequenz verlöschen, während gleichzeitig die Lichtbogenhysteresis bis dahin immer größer wird.

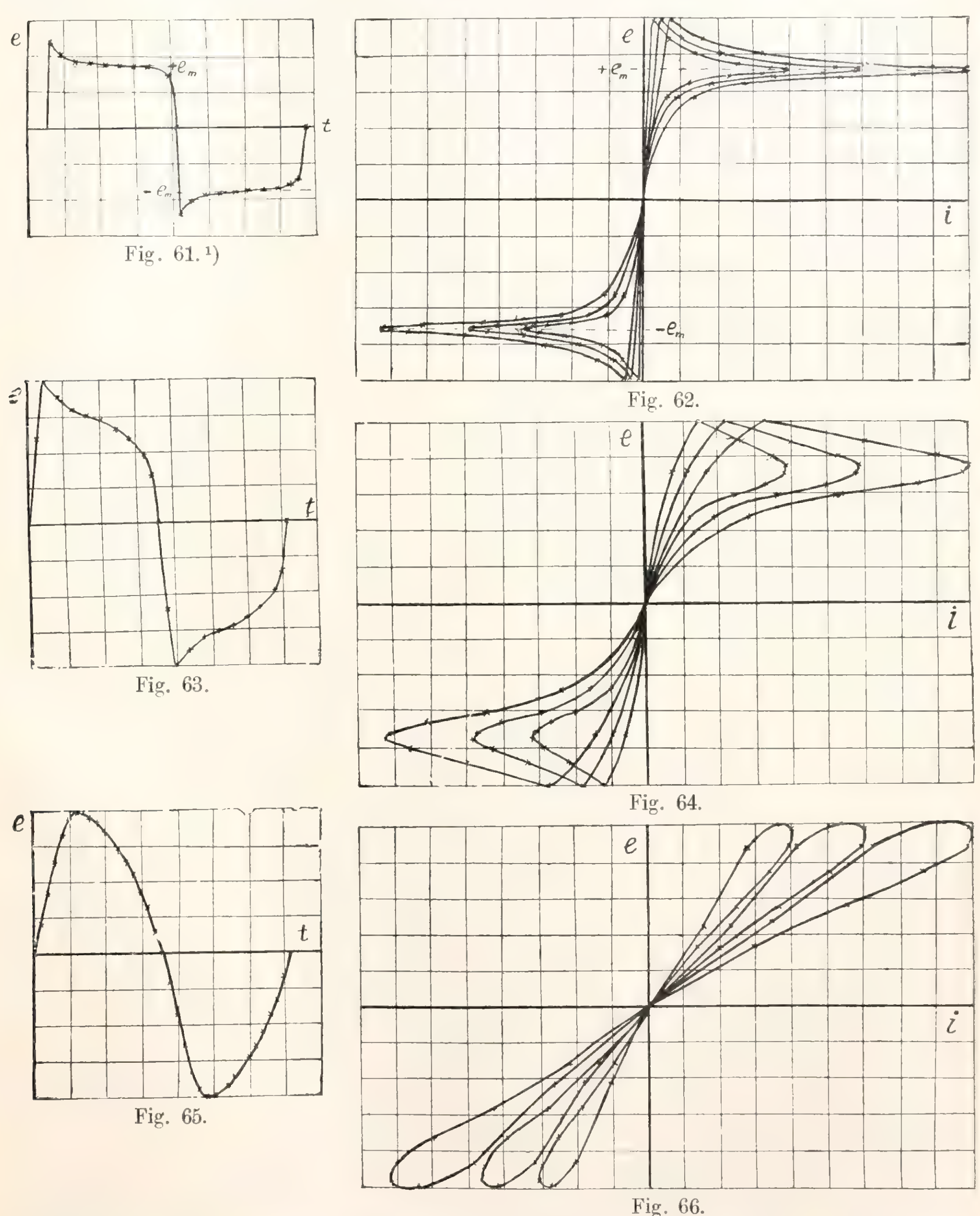


Fig. 61.[1]) Fig. 62. Fig. 63. Fig. 64. Fig. 65. Fig. 66.

[1]) Figur 61 bis 66 sind dem Werke von D. Roschansky, Funkenwiderstand entnommen.

Ist $\frac{W}{L}$ groß, wie bei den Metallen, so gehören sehr hohe Frequenzen dazu, die Spitze der dynamischen Kurven herunterzudrücken, d. h. bei Metallen sind Wechsellichtbogen kleinerer Spannung nur bei sehr hohen Frequenzen möglich.

Daß die Simonsche Theorie auch das beschriebene Verhalten der Hochfrequenzwechselströme zwischen Metallelektroden (Funken) beschreibt und eine sichere Antwort auf die Frage nach dem Wesen des sogenannten Funkenwiderstandes gibt, zeigte Roschansky (1908). Die von ihm auf Grund der Theorie berechneten Spannungskurven und Charakteristiken sind in Figur 61 bis 65 dargestellt. Figur 61 und 62 zeigen Spannungsverlauf und Charakteristiken für niedere Frequenzen, Figur 63 und 64 für mittlere, Figur 65 und 66 für hohe Frequenzen. Ein Vergleich mit den Figuren 34 bis 40 zeigt eine überaus befriedigende Uebereinstimmung zwischen den beobachteten und den aus der Theorie berechneten Diagrammen. Näheres über Funkenwiderstand siehe im Artikel „Funkenentladung".

Für einen unsymmetrischen Lichtbogen, z. B. zwischen Metall und Kohle, haben wir die entsprechenden dynamischen Kurven zu kombinieren und übersehen ohne weiteres, daß dann Diagramme herauskommen, wie es an dem Kohle-Kupferlichtbogen in Figur 41 und 42 aufgenommen wurde. Man erkennt, daß die sogenannte Ventilwirkung eine notwendige Folge ist aus der Verschiedenheit des $\frac{W}{L}$ an beiden Elektroden.

c) Ueber einen Gleichstromlichtbogen gelagerter Wechselstrom. Für den Abschnitt A 5 d behandelten Fall eines einem Gleichstrom übergelagerten Wechselstromes läßt sich in ähnlicher Weise verfahren. Eine Wechselstromleistung von der Frequenz ω lagert sich über die Gleichstromleistung EJ. Es ergibt sich, daß dann TF ebenfalls mit der Frequenz ω um den Gleichgewichtswert T_0F_0 pendelt, mit einer Phasenverschiebung φ, die durch $\operatorname{tg}\varphi = \frac{\omega L}{W}$ bestimmt ist. Die Konstruktion der Charakteristiken aus den zeitlich zusammengehörigen Werten von Leistungshyperbeln und TF-Strahlen ergibt dann genau das, was A 5 d Fig. 43 u. 44 beschrieben ist.

Man hat somit ein allgemeines exaktes Verfahren, die dynamischen Charakteristiken bei beliebigen Wechselstromvorgängen im Lichtbogen auf die statischen zurückzuführen, und die Lichtbogenhysteresis erscheint durch die Größen L und W meßbar ausgedrückt. Je größer L und je kleiner W, also je größer der Quotient $\frac{L}{W}$, desto größer ist die Lichtbogenhysteresis.

Die Lichtbogenhysteresis ist nun, wie ein Vergleich dieses Abschnittes mit 2f ergibt, von grundlegender Bedeutung für die Selbsterregung von elektrischen Schwingungen mit Hilfe des elektrischen Lichtbogens. Man kann solche Schwingungen mit um so höherer Frequenz erzeugen, je kleiner die Lichtbogenhysteresis ist. Als Mittel zur Verringerung derselben drängen sich, wenn man auf die Bedeutung der Konstanten L und W zurückgeht, z. B. auf: Starke Abkühlung der Elektroden, Einbetten des Lichtbogens in ein Gas von großer Wärmeleitungsfähigkeit und großer Ionenbeweglichkeit (Wasserstoff), Anwendung von Metallelektroden hoher Wärmeleitfähigkeit. Es wird im Artikel „Elektrische Schwingungen" gezeigt werden, in welcher Weise und mit welchem Erfolge diese Hilfsmittel tatsächlich bei der Erzeugung ungedämpfter Schwingungen herangezogen worden sind.

C. Technische Anwendung der Lichtbogenentladung.

C1. Wärmewirkungen. Die im Lichtbogen gebotene Möglichkeit, große Wärmemengen auf einen engen Raum zu konzentrieren, wird mannigfach technisch ausgenutzt.

1a) Lichtbogenschweißeinrichtungen. Bei den Versuchen von Benardos wird zwischen dem Schweißstück als der einen Elektrode und einem Kohlenstab als der zweiten ein Lichtbogen gebildet, der das Werkstück auf diese Weise an den zu verbindenden Kanten zum Schmelzen und zum Ineinanderfließen bringt.

Bei dem Verfahren von Slavianoff besteht auch die bewegliche Elektrode aus Metall der gleichen Art wie das Schweißstück. Die Schweißstelle wird mit einer Form umgeben, in die das vom Lichtbogen geschmolzene weißglühende Metall der Elektrode hineinfließt. Auf diese Art lassen sich große zerbrochene Maschinenteile wieder zusammenfügen. Die Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft in Berlin stellt besondere Dynamomaschinen zur Erzeugung der 200 bis 800 Amp. starken Lichtbogen her, die erfordert werden.

Zerener bläst den Lichtbogen durch einen Magneten wie eine Stichflamme auf die Schweißfugen, die so, eventuell unter Vermittelung eines Lotes, zusammengefügt werden können.

Das Schweißverfahren von Lagrange und Hoho verwendet die beiden zu verschweißenden Stücke als negative Elektroden eines zwischen ihnen und einer Schwefel-

säurelösung übergehenden Lichtbogens. Als positive Stromzuführung zu dem Säuretrog dient eine Bleiplatte oder dgl. Man taucht die Schweißflächen in die Lösung ein, der Lichtbogen bildet sich und bringt alsbald die zu verschweißenden Stellen in Schweißglut.

Ein vom Lichtbogen geheizter Lötkolben wird von der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft in Berlin konstruiert. Der Lichtbogen wird in einer abgeschlossenen Kammer zwischen dem Kupferkolben D (siehe Fig. 67) und dem Kohlenstift A gebildet. Das Zünden erfolgt durch einen Druck auf den federnden Knopf C.

1b) Elektrische Oefen. Sie dienen dazu, Schmelz- und Verdampfungsprozesse, sowie chemische Vorgänge bei den höchsten Temperaturen einzuleiten. Die meisten heute gebräuchlichen Oefen beruhen auf Kon-

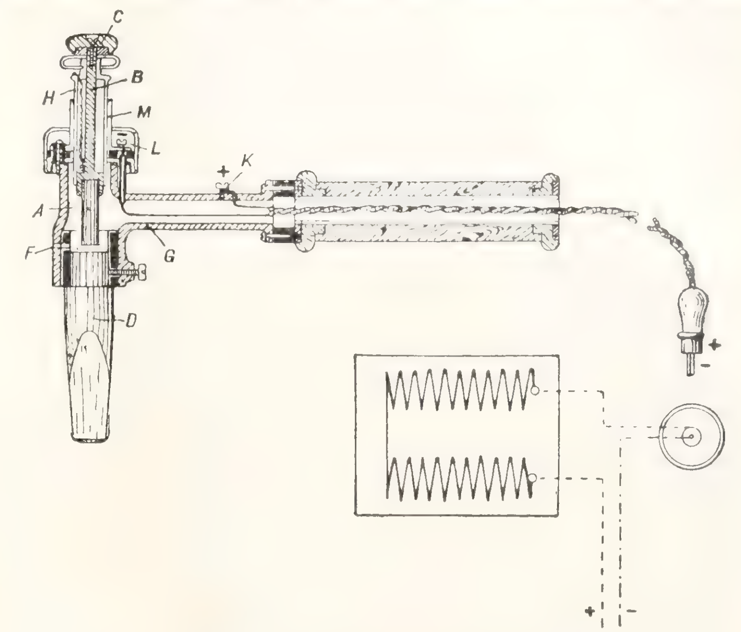


Fig. 67. Durch einen Lichtbogen geheizter Lötkolben.

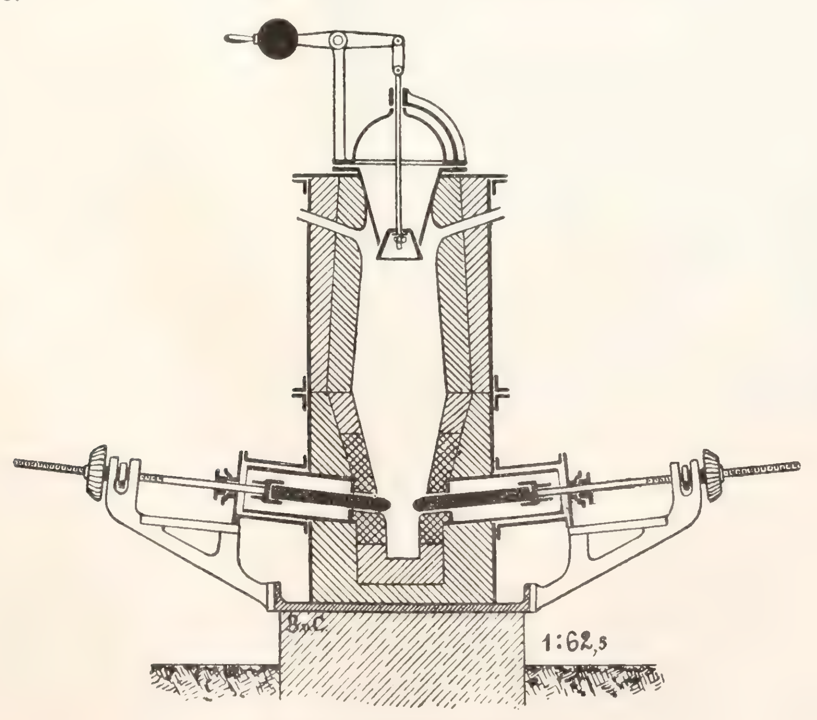


Fig. 68. Lichtbogenhochofen.

struktionsgedanken von Ch. W. Siemens. Sie lassen sich in folgende Arten einteilen:

1. Der Lichtbogen heizt lediglich den Raum, in welchem der Wärmeprozeß sich vollziehen soll.

2. Das Material der einen Elektrode des Lichtbogens beteiligt sich an dem zu vollziehenden Prozeß.

3. Beide Elektroden beteiligen sich an diesem Prozeß.

Im Falle 2 wird häufig die beteiligte Elektrode als Tiegel ausgebildet, in dem sich der Prozeß abspielt. Durch eine Magnetspule sorgt man, der Bogenflamme die zur besten Wärmewirkung günstige Richtung zu geben.

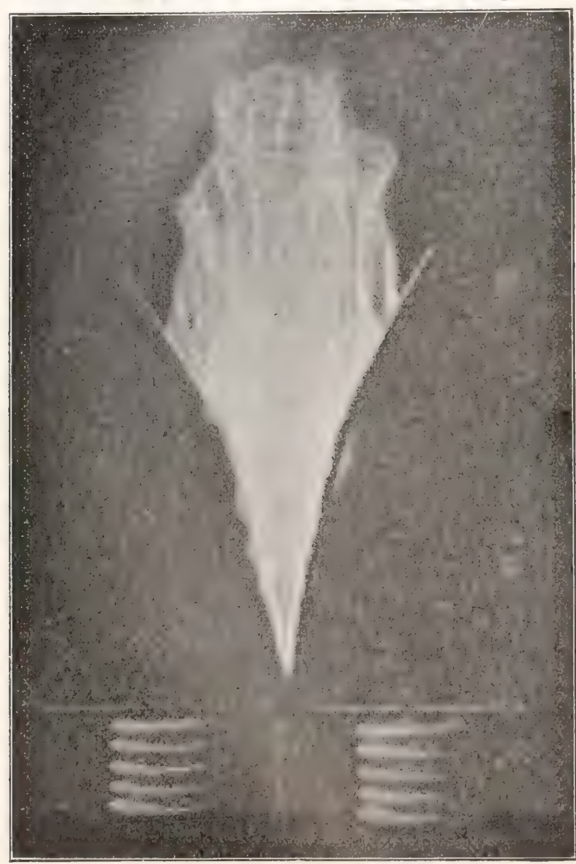


Fig. 69.[1]

Am meisten und erfolgreichsten ist in den letzten Jahrzehnten der Lichtbogenofen mit Kohlenelektroden von Moissan verwendet worden. Da Kohle bei der hohen Temperatur eine hohe Oxydationsfähigkeit besitzt, so hat der Kohlenlichtbogen energische reduzierende Wirkung. Es gelingt mit seiner Hilfe den meisten sonst schwer reduzierbaren Metallverbindungen ihren Sauerstoff zu entreißen. Auf diese Art stellte Moissan eine Reihe von Körpern rein dar, z. B. Chrom, Mangan, Molybdän, Wolfram, Uran, Vanadium, Zirkon, Titan. Große industrielle Bedeutung hat diese Methode nicht erlangt. Andererseits gelang es Moissan, in der großen Hitze des Lichtbogens eine Reihe von bisher noch nicht dargestellten Verbindungen zu erzeugen, nämlich viele Karbide, Silicide und Boride. Besonders bekannt sind seine erfolgreichen Versuche geworden, im elektrischen Ofen künstliche Diamanten herzustellen, indem er die Kohle unter sehr hohem Druck verflüssigte und kristallinisch erstarren ließ.

Von den Karbiden haben besonders das Siliciumkarbid oder Karborund wegen seiner dem Diamanten nahekommenden Härte als Schleif- und Poliermittel, das Kalziumkarbid als Ausgangsprodukt der Acetylenbeleuchtung und zur Darstellung der Cyanide von alkalischen Erden und Alkalien industrielle Bedeutung erlangt. Doch haben sich die namentlich an das Kalziumkarbidverfahren geknüpften Erwartungen nicht in dem gehofften Maße erfüllt.

Auch in der Glasindustrie wird in neuer Zeit der elektrische Lichtbogen, wie es scheint mit Erfolg zum Schmelzen verwendet.

Von Stassano wurde ein Hochofen zur Stahlerzeugung konstruiert (siehe Fig. 68), in dem Eisenerze mit Kohle gemengt durch einen Wechselstromlichtbogen von 2000 Amp. zwischen Kohlenstäben reduziert werden. Eine Art von Bessemerbirne mit Heizung durch den elektrischen Kohlenbogen ist von Heroult gebaut worden.

C 2. Chemische Wirkungen. Die Anwendungen der chemischen Wirkungen, soweit sie mit der Wärmewirkung Hand in Hand gehen, sind im vorigen Abschnitt besprochen. Hier bleibt übrig darauf einzugehen, wie sie im Großen zur Bindung des atmosphärischen Stickstoffs herangezogen werden. Das Prinzip des Verfahrens ist Abschnitt A 5 auseinandergesetzt: es ist nötig, die Luft, die in Berührung mit dem Lichtbogen war und dabei Stickoxyd (NO) gebildet hat, möglichst schnell abzukühlen. Sonst würde alsbald wieder ein Zerfall des Stickoxyds eintreten. Dieser Forderung versuchen die

[1]) Figur 69 bis 72 sind dem Werke von J. Zenneck, Die Verwertung des Luftstickstoffes (Leipzig 1911) entnommen.

verschiedenen Oefen in verschiedener Weise gerecht zu werden:

Der Apparat von Pauling (Salpetersäure-Industriegesellschaft, Gelsenkirchen) läßt einen mächtigen Wechselstromlichtbogen zwischen zwei Metallhörnern übergehen, ähnlich wie es bei den sogenannten Hörnerblitzableitern geschieht (Fig. 69). Dabei steigen die während der Halbperioden der Wechselspannung gebildeten Bogen schnell in die Höhe und ziehen sich zu großer Länge aus. Sie bestreichen dabei eine große Fläche und kommen mit relativ viel Luft in Berührung, die an ihnen entlang in die Höhe geblasen wird.

In dem Ofen von Birkeland-Eyde (Fig. 70) brennt ein Wechselstromlichtbogen von einigen Hundert Amp. in einer wie in der Figur 71 angeordneten flachen Chamottekammer quer zu den Polen eines starken Elektromagneten. Er wird dadurch ähnlich wie es bei dem vorigen Verfahren durch den Luftstrom geschah, durch die magnetischen Kräfte seitlich zur Richtung des Magnetfeldes abgetrieben und bestreicht in der Kammer eine weite Fläche. Da der Strom 100 mal in der Sekunde seine Richtung wechselt, findet diese Ablenkung abwechselnd nach oben und unten statt; dem Auge erscheint der Bogen daher wie eine mächtige Flammenbogenscheibe von etwa 2 m Durchmesser, welche die ganze Kammer aa ausfüllt. Durch die Kanäle wird in der geeigneten Weise die Luft an der Lichtbogenscheibe entlang geblasen.

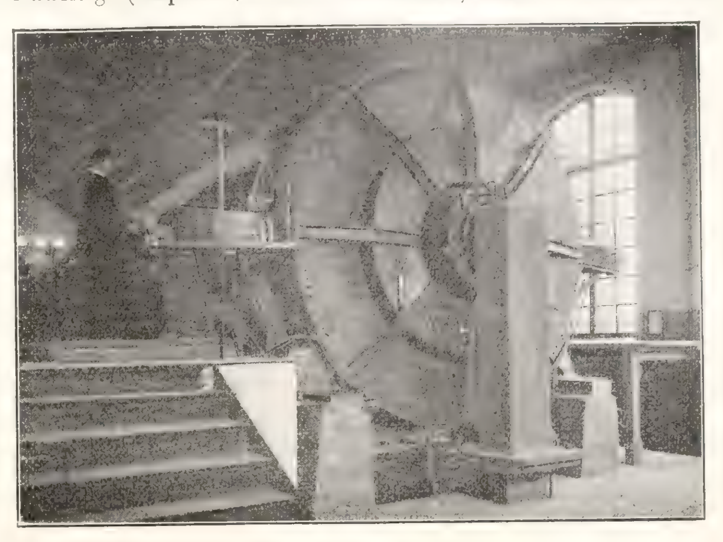


Fig. 70. Lichtbogenofen zur Stickstoffbindung nach Birkeland-Eyde.

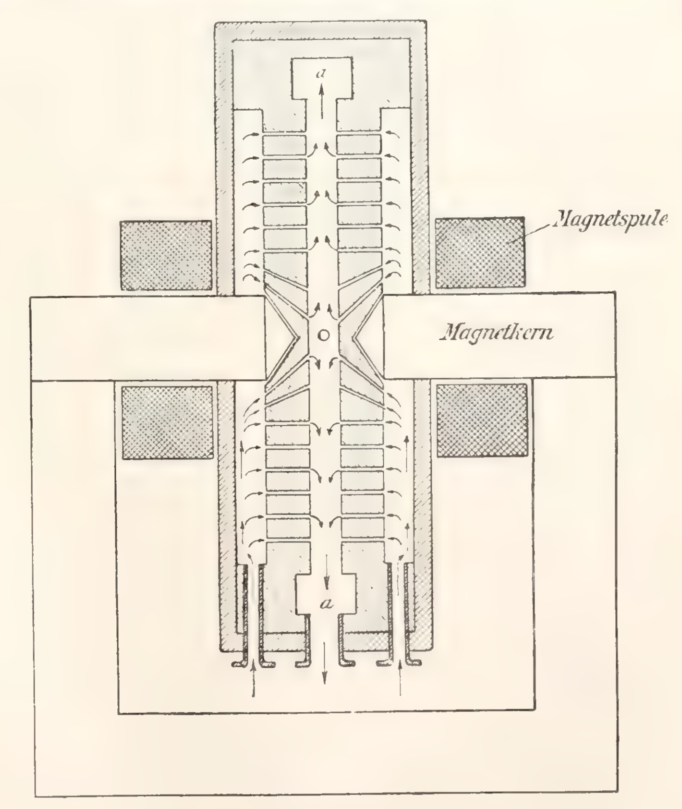
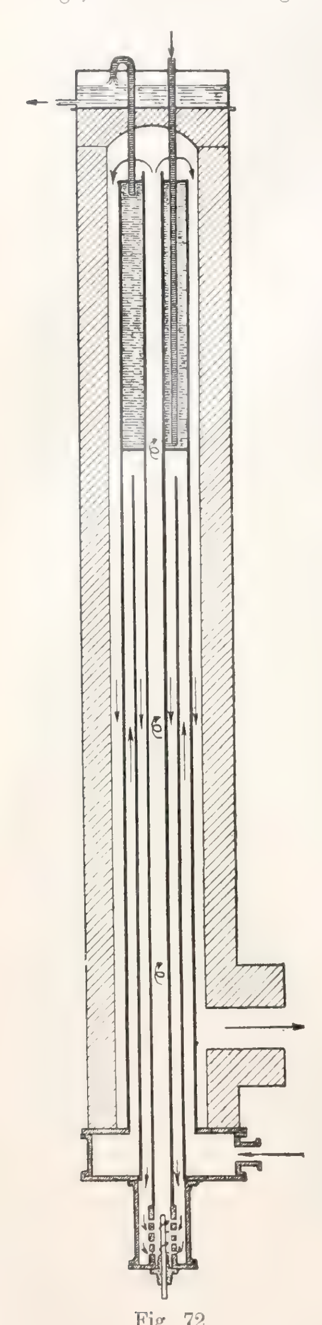


Fig. 71.

Von Petersson, sowie von Brion und Moscicki wird der Lichtbogen ebenfalls senkrecht zu einem starken Magnetfeld er-

zeugt, aber so, daß er radial von einer Innenelektrode zu einer ringförmigen Außenelektrode übergeht. Wird das Magnetfeld erregt, so rotiert er mit großer Geschwindigkeit und bildet gleichfalls eine Lichtbogenscheibe, an der man die Luft entlang bläst.


Fig. 72.

Endlich ist der Ofen der Badischen Anilin- und Sodafabrik zu nennen. Er besteht aus einem Eisenrohr, in dessen Achse ein bis 8 m langer Wechselstromlichtbogen brennt. Die Luft wird vom Fuße des Rohres durch tangential gestellte Röhren eingeblasen und wirbelt in dem Rohre empor. Dadurch wird auch der Lichtbogen in seiner Achsenlage festgehalten. Die kalte Luft wird durch Zentrifugalkraft am weitesten nach außengewirbelt, so daß die Röhren trotz des sehr heißen Lichtbogenkerns relativ kalt bleiben. Figur 72 zeigt den Schnitt durch einen technischen Ofen der Art. Man sieht, daß die eintretende Luft durch die den Ofen verlassenden Gase selbst vorgewärmt wird. Die Zündung eines solchen Ofens erfolgt dadurch, daß man am unteren Ende des Rohres zwischen Rohrrand und unterer Elektrode einen Lichtbogen durch Kontakt mit einem Kohlenstück einleitet, der dann alsbald an der Rohrwand in die Höhe klettert und sich in die Achse einstellt. Mit diesem Ofen scheint die höchste Ausbeute und höchste Konzentration des Endproduktes (Kalksalpeter) erzielt zu werden.

Als Elektroden dürfen bei allen diesen Oefen nur Metalle dienen, da ja die reduzierenden Eigenschaften des Kohlenbogens dem gewünschten Oxydationsprozeß entgegenarbeiten würden.

Das Stickoxyd, welches die Oefen mit 800 bis 1000° verläßt, wird zunächst zur ökonomischen Wärmeabgabe unter Dampfkessel geleitet, dann in große Oxydationskammern, wo das Stickoxyd weiteren Sauerstoff aus der Luft aufnimmt und zu Stickstoffdioxyd (NO_2) wird. Dann werden die nitrosen Gase in großen Berieselungstürmen mit Wasser in Berührung gebracht und von ihm unter Bildung von Salpetersäure absorbiert. Die Salpetersäure wird über Kalkstein geleitet, wo das für die Düngung gewünschte Endprodukt, der Kalksalpeter, entsteht.

C 3. Lichtwirkungen. 3a) Die allgemeine Entwickelung der Lichtbogenbeleuchtung. Die Bestrebungen, den Lichtbogen systematisch zu Beleuchtungszwecken heranzuziehen, beginnen in den vierziger Jahren des vorigen Jahrhunderts. Bis vor etwa 10 Jahren war es lediglich der Kohlenlichtbogen, der in den sogenannten Bogenlampen Verwendung fand; seitdem ist auch der Quecksilberlichtbogen vielfach in Benutzung genommen worden.

Lange Zeit kam nur der offene Lichtbogen zwischen Kohlenstiften in Frage; der Lichtbogen also, der in direkter Kommunikation mit der normalen Atmosphäre brennt. Auch heute ist er noch viel im Gebrauch. Bei ihm verbrennen die Kohlenstifte unter Mitwirkung der Luft ziemlich rasch, so daß man nach einigen Stunden (bis zu 10) neue Kohlenstifte einsetzen muß. Darum verlockte die Erkenntnis, daß bei Luftabschluß der Abbrand so erheblich verringert wird, zur Konstruktion der sogenannten Einschlußbogenlampen (seit 1894). Bei diesen wird der Bogen durch ein Glasgefäß von der atmosphärischen Luft getrennt, so daß er lediglich in den von ihm entwickelten Gasen brennt. Man kommt so zu Lampen, die bis 200 Stunden ohne Kohlenwechsel brennen, also erhebliche Ersparnis an Material und Bedienung bringen. In beiden Fällen sind die Krater die wesentlichen Quellen der Lichtstrahlung.

Seit etwa 10 Jahren endlich kam man zur Verwendung von Kohlenstiften mit unverbrennlichen Zusätzen, deren kleinste Teilchen im Lichtbogen auf sehr hohe Temperatur kommen und so den Lichtbogen selbst zu einer

intensiven Lichtausstrahlung bringen. Der Zusatz besteht im wesentlichen aus etwa 15% Flusspat nebst Salzen, welche eine Färbung des Lichtes bezwecken (heute meist Kalziumsalze, welche gelbes Licht liefern). Die Lampen, die mit solchen „Effektkohlen" offenen Lampen). Wegen der größeren Lichtbogenlänge beteiligt sich der Bogen selbst in größerem Verhältnis an der Lichtlieferung und das Licht erscheint violetter. Aus diesem Grunde ist es auch relativ reicher an photographisch wirksamen Strahlen.

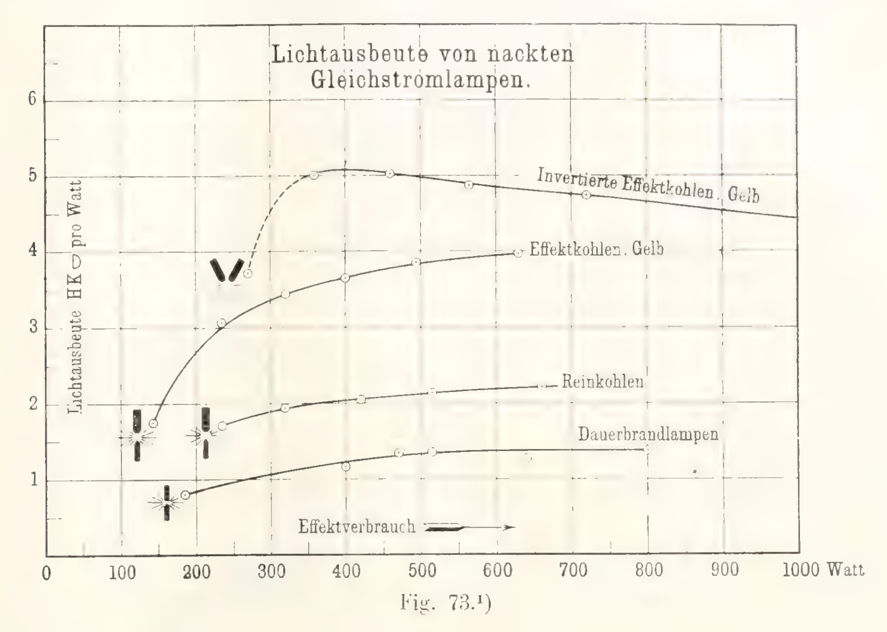


Fig. 73.[1])

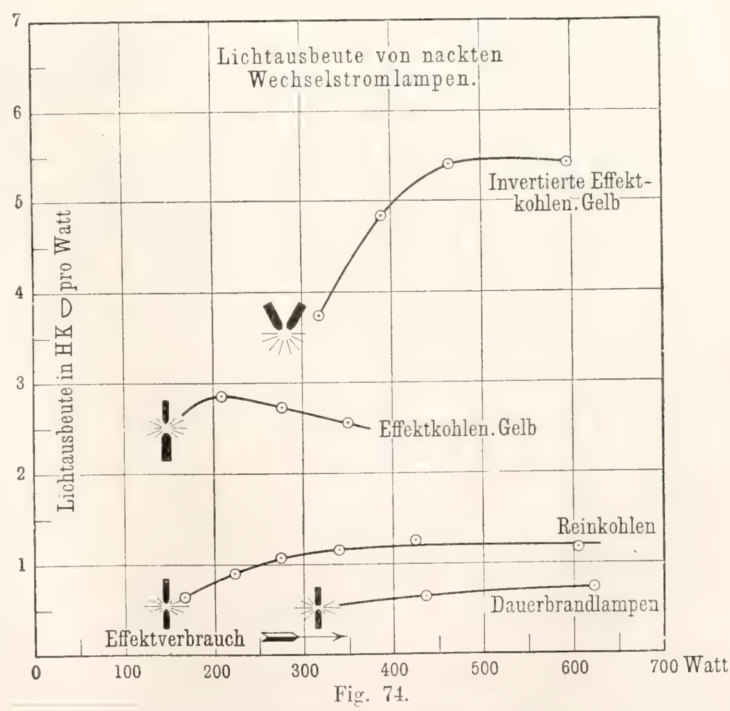


Fig. 74.

brennen, heißen Flammenbogenlampen. Wegen des großen Anteils, den der Lichtbogen an der Lichtlieferung nimmt, macht man hier den Bogen 15 bis 20 mm lang, während man sich sonst auf höchstens 5 mm beschränkt.

Die Einschlußbogenlampen strahlen, wegen des scharfkantigen Abbrennens der Kohlen relativ mehr Licht nach den Seiten aus, als die offenen Lampen. Das bietet für manche Zwecke. z. B. Innenbeleuchtung Vorteile. Die Bogenlänge muß aus demselben Grunde etwas größer gewählt werden, so daß die Lampen meist 70 bis 80 Volt Klemmenspannung haben (gegen 40 bis 50 bei den

[1]) Figur 73 und 74 sind dem Werke von E. Rasch, Das elektrische Bogenlicht (Braunschweig 1910) entnommen.

Wegen des völligen Abschlusses des Lichtbogenraumes können glühende Kohlenteile nicht nach außen gelangen, die Feuersicherheit ist eine erhöhte. Diesen für manche Zwecke als Vorteile empfundenen Eigenschaften der Einschlußlampen stehen als Nachteile gegenüber unruhiges Brennen und geringere Lichtausbeute, die damit zusammenhängt, daß die sekundäre Erhitzung der Elektroden durch die Verbrennung wegfällt. Sie hat auch zur Folge, daß die Ersparnisse an Kohlenverbrauch und Bedienung durch höheren Energieverbrauch meist kompensiert oder gar überkompensiert werden.

Ueber die Lichtausbeute (mittlere hemisphärische Helligkeit in HK pro Watt) von Gleichstromlampen der drei Arten gibt Figur 73, von Wechselstromlampen Figur 74. Aufschluß. Man sieht, daß in jedem Falle die Lichtausbeute von dem Energieverbrauch der Lampe abhängt und meist mit diesem asymptotisch auf einen Höchstwert wächst. Bei den Flammenbogenlampen gibt es allerdings einen Energieverbrauch, der ein Optimum von Lichtausbeute liefert. Bei Quecksilberlampen hat man Lichtausbeuten bis 5,6 HK/Watt hemisphärisch beobachtet. Der reine Elektrolytlichtbogen soll eine Lichtausbeute von 5,2 HK besitzen (Rasch). Man sieht, daß die Flammenbogenlampen eine Steigerung der Lichtausbeute um das 4—5 fache gegenüber den Lampen mit gewöhnlichen Kohlen gebracht haben und begreift, daß sie im Begriff sind, alle früheren Systeme zu verdrängen. Indem man die bisher übliche Art der vertikal übereinander stehenden Kohlenstäbe durch eine Anordnung ersetzte, bei der sich der Lichtbogen zwischen den unteren Enden zweier schräg gegeneinander geneigter Kohlenstäbe bildet (invertierte Lampen), gelangte man zu einer weiteren, erheblichen Steigerung der Lichtausbeute, wie das Figur ~~65~~ 73 und ~~66~~ 74 zeigen.

Die höchste Lichtausbeute haben die Quecksilberlampen. Dazu kommt noch die relative Einfachheit ihrer Konstruktion und das Fehlen jeglichen Materialverbrauchs beim Betriebe. Wegen ihres an roten Strahlen so armen Lichtes werden sie aber wohl so lange auf enge Anwendungsgebiete beschränkt bleiben, als es nicht gelingt, diesen Mangel zu beseitigen.

3b) Die Kohlenbogenlampen. Um den Kohlenlichtbogen zu Beleuchtungszwecken brauchbar zu machen, wurden zahllose Einzelkonstruktionen von Bogenlampen erdacht. Ihre wichtigsten Funktionen sind: α) nach dem Anlegen der Spannung durch Aneinanderbringen der Kohlenenden den Lichtbogen zu zünden, β) die Kohlen zur gewünschten Lichtbogenlänge auseinanderzuziehen, γ) diese Länge entsprechend dem Abbrand der Kohlenenden dauernd nachzuregulieren. Dazu kommen für bestimmte Zwecke als weitere Aufgaben: δ) den Brennpunkt auf derselben Stelle zu halten (Fixpunktlampen), ε) bei Lampen, welche hintereinander geschaltet brennen, zu sorgen, daß im Falle des Ausgehens der Lampe die Leitung selbsttätig kurzgeschlossen wird. Denn sonst würden auch die übrigen Lampen mit verlöschen. Die Lampen zerfallen in Handregulierlampen und automatisch regulierende Lampen. Bei den ersteren wird das Zünden und Regulieren durch Zahn und Trieb nach Bedarf von Hand besorgt. Solche Lampen, deren Figur 76 eine zeigt, werden viel zu Projektionszwecken und in Scheinwerfern benutzt. Sehr zweckmäßig sind die Typen, bei denen die positive Kohle horizontal gelagert ist, weil bei ihnen der leuchtende Krater stets an derselben Stelle bleibt.

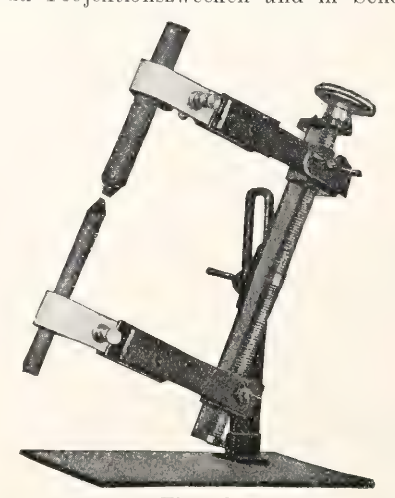


Fig. 76.

Zahllos sind die Konstruktionen, die zur automatischen Regulierung angegeben sind. Das Typische aller dieser Konstruktionen besteht in folgendem: zur Regulierung des einmal bestehenden Bogens wird die Kraftwirkung von Elektromagneten auf ihre Eisenanker oder die Saugwirkung von Stromspulen auf Eisenkerne herangezogen. Und zwar bewegen diese Kräfte teils direkt die Kohlenstifte der Lampe, teils regieren sie indirekt durch Sperrwerke eine besondere Triebkraft, welche die Bewegung der Stifte besorgt. Meist ist die Schwerkraft, oft Federkraft, bisweilen eine Spiralfeder, wohl auch elektromagnetische Kraft als besondere Triebkraft herangezogen. Das zur Zündung erforderte Berühren und Auseinanderziehen besorgt meist derselbe Elektromagnet, der auch das Regulieren zu erledigen hat. Auf die Einzelheiten sowie auf besondere technische Komplikationen kann hier nicht

eingegangen werden. Die Betätigung jener Regulierelektromagnete erfolgt durch die elektrischen Größen des Lichtbogens und zwar sind dreierlei Schaltungen möglich. 1. Bei der Hauptschlußlampe (schematisch in Figur 76 dargestellt) wird die Regulierspule durch den direkten Strom der Bogenlampe betätigt. Die Saugwirkung der Spule auf ihren Eisenkern sucht die Bogenlänge zu vergrößern, wobei der Strom und

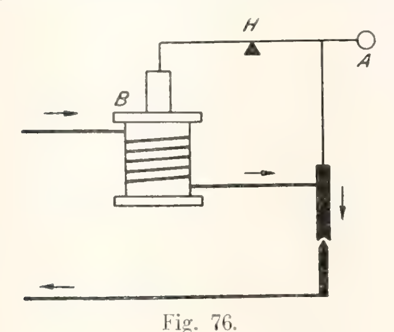


Fig. 76.

damit die Saugwirkung bis zu einem Gleichgewicht abnehmen. Bezeichnet i_H die Stromstärke, n_H die Anzahl der Spulwindungen, A den Ueberschuß des Gewichtes (oder die Federspannung) auf der rechten Seite des Hebeldrehpunktes, so ist für das Gleichgewicht

$$Kn_H i_H = A$$

(K ist ein Proportionalitätsfaktor) also

$$i_H = \frac{A}{n_H K} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 26)$$

Man sieht, daß die Hauptschlußlampe auf Konstanz des in dem Lichtbogen fließenden Stromes reguliert. Hauptschlußlampen können nicht hintereinander geschaltet werden, da jeder Regulierungsvorgang der einen Lampe das Gleichgewicht der anderen stört.

2. Bei der Nebenschlußlampe (siehe Schema Figur 77) wird die Regulierspule von

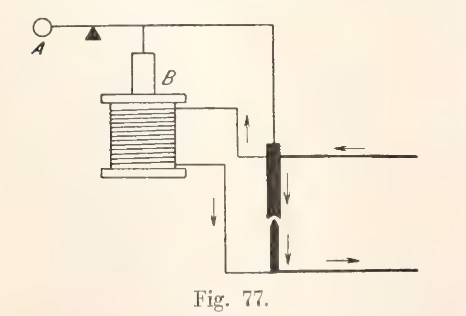


Fig. 77.

einem dem Lichtbogen parallel abgezweigten, also der Lichtbogenspannung e proportionalen Strome betätigt. Die Saugwirkung der Spule auf ihren Eisenkern sucht die Kohlen zu nähern, wobei der Spulenstrom und somit die Saugwirkung bis zum Gleichgewicht mit dem Gegengewicht A abnehmen. Der Strom in der Regulierspule ist $i_N = \frac{e}{w}$ (w Widerstand der Spule). Für das Gleichgewicht gilt wieder

$$Kn_N i_N = A = Kn_N \frac{e}{w}$$

wobei n_N die Anzahl der Spulenwindungen bedeutet

oder $$e = \frac{Aw}{n_N K} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 27)$$

Man sieht, daß die Nebenschlußlampe auf Konstanz der am Lichtbogen wirksamen Spannung reguliert. Nebenschlußlampen beeinflussen sich in Hintereinanderschaltung sehr viel weniger als Hauptschlußlampen.

3. Die Differentiallampe (Schema in Figur 78) vereinigt Hauptschluß- und Neben-

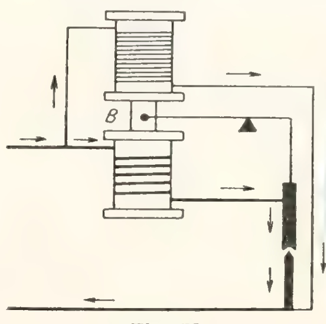


Fig. 78.

schlußregulierung. Die obere, Nebenschlußspule sucht durch ihre Saugwirkung auf den Eisenkern die Kohlen zu nähern, die untere, Hauptschlußspule sie zu entfernen. Diejenige Entfernung stellt sich als Gleichgewicht ein, bei der beide Saugkräfte gleich sind. Es gilt dann

$$Kn_H i_H = n_N i_N$$

Nun ist $$i_N = \frac{e}{w}$$

also $$Kn_H i_H = n_N \frac{e}{w}$$

$$\frac{Kn_H w}{n_N} = \frac{e}{i_H} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 28)$$

$\frac{e}{i_H}$ ist der scheinbare Widerstand des Lichtbogens; die Differentiallampe reguliert auf Konstanz des scheinbaren Lichtbogenwiderstandes ein. Differentiallampen lassen sich also beliebig hintereinander schalten, ohne sich gegenseitig zu beeinflussen.

3c) Quecksilberbogenlampen. Der in einem luftleeren Glasgefäß erzeugte Quecksilberlichtbogen wurde zuerst von Cooper Hewitt zu einer betriebssicheren Bogenlichtbeleuchtung herangezogen. Er erkannte,

daß man dem Lampengefäße eine genügend große Oberfläche geben müsse, damit durch ausreichende Kondensation des Quecksilberdampfes der Dampfdruck niedrig genug gehalten und das Glasgefäß vor dem Zerplatzen gesichert wurde. Auch ersann er folgende zweckmäßige Art zur Zündung des Lichtbogens (Fig. 79): Parallel zur Lampe wird eine Selbstinduktionsspule mit Eisenkern geschaltet. Durch einen Schalter wird nun die Lampe für einen Augenblick kurzgeschlossen, also das Magnetfeld der Spule erregt, und dann der Schalter rasch geöffnet. Dann entwickelt die Selbstinduktionsspule eine so große Oeffnungsspannung an der Lampe, daß der Zündgipfel überklettert und der Lichtbogen eingeleitet wird. Spätere Konstruktionen zünden den Lichtbogen durch Kippen der Lampen, bis durch Ueberfließen des Quecksilbers vorübergehend eine leitende Verbindung hergestellt wird. Wieder andere bewirken dieses Ueberfließen durch elektromagnetisches Einsenken eines Eisenkernes in das Quecksilber der einen Elektrode. Auch mit Hilfe eines die Elektroden verbindenden Eisendrahtes wird die Zündung bewirkt: er kommt durch den Strom in Weißglut, bis der dem Drahte parallel gezündete Lichtbogen ihm den wesentlichsten Teil des Stromes wieder entzieht. Durch Verwendung des Quarzglases zum Gefäß der Quecksilberlampen gelang es, ihre Lichtausbeute bis auf 5,3 HK-Watt zu steigern. Das Quarzglas gestattet nämlich, die Lampen mit relativ großem inneren Druck zu brennen. Die Lichtausbeute steigt aber, wie Küch und Retschinsky zeigten, in der Figur 80 dargestellten Abhängigkeit mit dem Dampfdruck des Quecksilbergases.

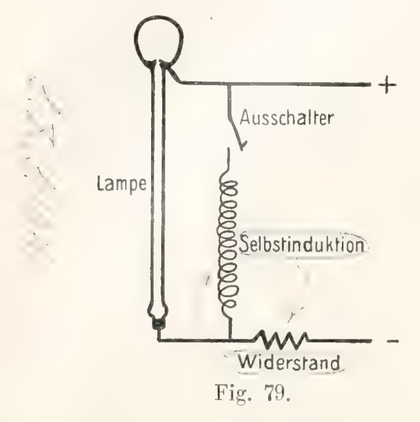


Fig. 79.

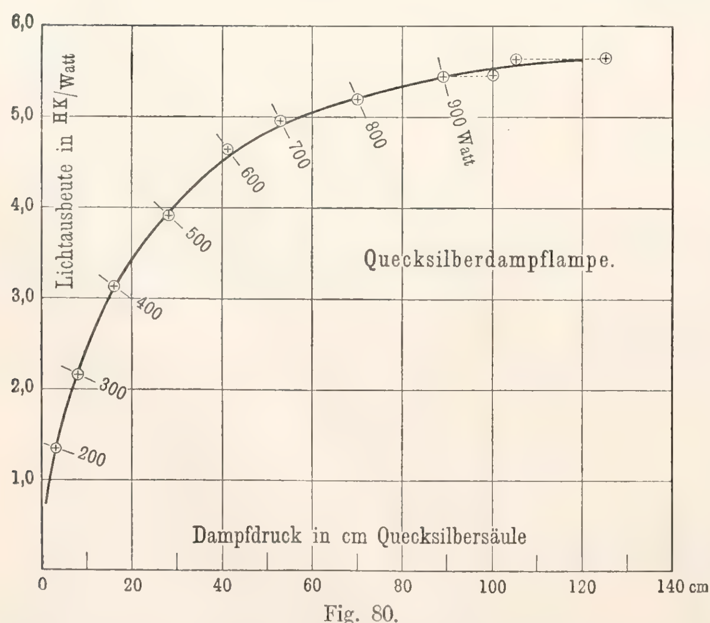


Fig. 80.

d) Bogenlampen für besondere Zwecke. Große Bedeutung für das Seewesen und Kriegswesen haben die durch einen Lichtbogen betätigten Scheinwerfer gewonnen. Im Brennpunkte eines parabolisch geschliffenen Hohlspiegels steht der positive Krater eines Gleichstromkohlenlichtbogens, dessen Strahlung so in einem Bündel in die Ferne entsandt werden kann. Sinnreiche Mechanismen gestatten den Strahl schnell und zuverlässig in jede Richtung einzustellen. Mancherlei Einrichtungen kommen hinzu zur gelegentlichen Streuung des Lichtes auf eine breitere Fläche, Abblendeklappen zur Signalgebung, bei Leuchttürmen Vorrichtungen zur Charakterisierung des Leuchtfeuers als Blinkfeuer, Wechselfeuer, Drehfeuer, Funkelfeuer, Unterbrechungsfeuer usw. Es werden Lichtbogen bis zu einigen hundert Amp. verwendet. Die Lampen haben horizontalliegende Kohlen; sie müssen eine Regulierung haben, die gleichzeitig den Krater dauernd im Brennpunkte des Hohlspiegels hält (Fixpunktregulierung).

Der Lichtbogen, namentlich der mit größerer Bogenlänge ist an chemisch wirksamen Strahlen sehr reich. Darum finden

namentlich Einschlußbogenlampen viel für photographische Zwecke Anwendung. Es werden besondere Lampen für die Anfertigung von Lichtpausen nach Zeichnungen usw. in den Handel gebracht. Auch besondere Lampen für die Beleuchtung von photographischen Ateliers hat man konstruiert. Namentlich aber hat man auch, besonders durch Finsens Vorgehen, die aktinischen Strahlen der Bogenlampen für Heilzwecke mit vielem Erfolg nutzbar gemacht. Nicht nur bakterientötend, sondern auch stoffwechselerregend wirkt namentlich das violette und ultraviolette Licht. Die Lampen, die man für solche Zwecke konstruiert hat, verwenden entweder lange Kohlenlichtbogen, oder Lichtbogen zwischen Eisenelektroden, die an ultravioletten Strahlen besonders reich sind. Am meisten ultraviolette Strahlen liefern die Quarzglasquecksilberlampen, die daher auch zu solchen aktinischen Wirkungen immer mehr herangezogen werden und neuerdings auch für photochemische Zwecke in größerem Maße verwendet werden.

e) Lichttelephonie. Lagert man einem Gleichstromlichtbogen Mikrophonströme über (vgl. A6c), so schwankt das Licht in dem Rhythmus dieser Ströme auf und ab; der Lichtbogen entsendet gewissermaßen „sprechendes Licht". Diese Anordnung wurde von Bell und Simon als Sender für die von Bell 1880 erfundene Lichttelephonie eingeführt. Dadurch gelang es mit Hilfe von Scheinwerfern eine telephonische Uebertragung bis etwa 10 km weit zu erzielen. Das vom Scheinwerfer entsandte sprechende Licht wird am Empfangsorte auf eine „Selenzelle" konzentriert (siehe Fig. 81), einen aus einer bestimmten Selenmodifikation bestehenden, flächenhaft ausgebreiteten Leiter, dessen Widerstand mit zunehmender Intensität der Belichtung kleiner wird. Das sprechende Licht bewirkt also ein seinen Intensitätsschwankungen entsprechendes Auf- und Abschwanken des Widerstandes, so daß in einem mit der Selenzelle und einer Batterie hintereinander geschalteten Telephon die ursprüngliche Sprache wieder erscheint.

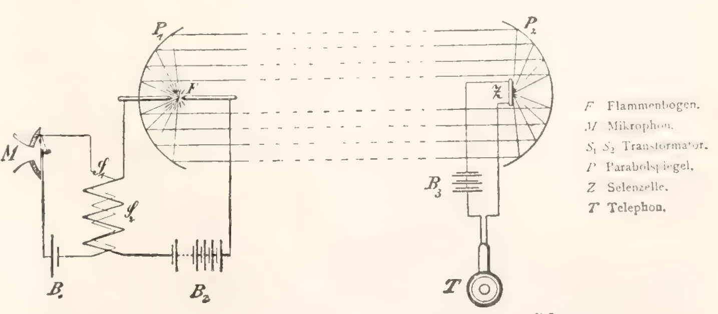


Fig. 81. Schema der Lichttelephonie nach Simon.

Ruhmer schlug vor, das „sprechende Licht" des sprechenden Lichtbogens auf einen bewegten photographischen Film zu werfen, auf dem dann der Rhythmus der Schallschwingungen durch stärker und schwächer geschwärzte Stellen fixiert wird. Zieht man nachher diesen Film mit derselben Geschwindigkeit vor einer gleichmäßig beleuchteten Selenzelle vorbei, so erscheint in dem von ihr betätigten Telephon die Sprache wieder (Lichtphonograph).

C 4. Weitere Anwendungen. Die Anwendung der unsymmetrischen Lichtbögen zum Umwandeln von Wechselstrom in Gleichstrom wird im Artikel „Elektrische Ventile" besprochen.

Die Anwendung des Lichtbogens zur Erregung gedämpfter oder ungedämpfter elektrischer Schwingungen im Artikel „Elektrische Schwingungen"; die Anwendung und Rolle des Lichtbogens bei Blitzschutzapparaten im Artikel „Blitz".

Literatur. *Zusammenfassende Werke:* ***E. Voit,*** *Der elektrische Lichtbogen Sammlung elektrotechn. Vorträge. Bd. I, Stuttgart 1896.* — ***Mrs. Ayrton,*** *The electric arc. London „The electrician" company.* — ***H. Birrenbach,*** *Theorie und Anwendung des elektrischen Bogenlichtes. Hannover 1903.* — ***B. Monasch,*** *Der elektrische Lichtbogen. Berlin 1904.* — ***W. v. Czudnochowski,*** *Das elektrische Bogenlicht. Leipzig 1906.* — ***C. D. Child,*** *Der Stand der Forschung über den Lichtbogen Jahrb. der Radioaktivität und Elektronik, Bd. III. Leipzig 1906.* — ***E. Rasch,*** *Das elektrische Bogenlicht. Braunschweig 1910.* — ***H. Th. Simon,*** *Der elektrische Lichtbogen (Experimentalvortrag). Leipzig 1911.* — *Die betreffenden Kapitel in Winkelmanns Handbuch der Physik. Bd. IV, S. 527 fg. Bearbeitet von* ***J. Stark.*** *Leipzig 1905.* — ***Thomson-Marx,*** *Elektrizitätsdurchgang in Gasen. S. 437, Leipzig 1906.*

Ueber die Lichtwirkungen: ***Kaysers*** *Handbuch der Spektroskopie. Bd. I, S. 154 fg., Leipzig 1900.* — *Neuere Spezialabhandlungen:* ***H. Th. Simon,*** *Akustische Erscheinungen am elektrischen Lichtbogen. Ann. d. Physik (3)* ***64,*** *233, 1898.* — ***W. Duddell and E. W. Marchant,*** *Experiments on alternate current arcs. Proc. of the inst. of electr. eng.* ***28,*** *1899.* — ***W. Duddell,*** *On rapid variations in the current through the direct-current arc. Ibid.,* ***30,*** *1900.* — ***H. Th. Simon,*** *Ueber den sprechenden Flammenbogen und seine Verwendung zu einer Telephonie ohne Draht. Physik. Zeitschr.* ***2,*** *253, 1901;* ***3,*** *278, 1902.* — ***G. Granquist,*** *Ueber die Bedeutung des Wärmeleitungsvermögens der*

Elektroden bei dem elektr. Lichtbogen. Upsala 1903. — **J. Stark,** *Zur Kenntnis des Lichtbogens. Ann. d. Phys. (4)* **12,** *673, 1903.* — **H. Th. Simon,** *Ueber die Dynamik der Lichtbogenvorgänge und über Lichtbogenhysteresis. Physik. Zeitschr.* **6,** *297, 1905.* — **M. Reich,** *Ueber Größe und Temperatur des negativen Lichtbogenkraters. Physik. Zeitschr.* **6,** *73, 1906.* — **H. Th. Simon,** *Zur Theorie des selbsttönenden Lichtbogens. Physik. Zeitschr.* **7,** *433, 1906.* — **K. Stockhausen,** *Der eingeschlossene Lichtbogen bei Gleichstrom. Leipzig 1907.* — **H. Th. Simon** *und* **W. Malcolm,** *Ueber den Lichtbogen bei kleinen Stromstärken. Physik. Zeitschr.* **8,** *471, 1907.* — **H. Th. Simon,** *Ueber ungedämpfte elektr. Schwingungen. Jahrb. d. drahtl. Telegr. u. Telephonie* **1,** *16, 1907.* — **H. Barkhausen,** *Das Problem der Schwingungserzeugung. Leipzig 1907.* — **Derselbe,** *Funkenwiderstand. Physik. Zeitschr.* **8,** *624, 1907.* — **D. Roschansky,** *Zur Frage des Funkenwiderstandes. Physik. Zeitschr.* **9,** *627, 1908. Zur Theorie des sogen. Funkenwiderstandes. Physik. Zeitschr.* **9,** *635, 1908.* — **K. W. Wagner,** *Der Lichtbogen als Wechselstromerzeuger. Leipzig 1910.* — **D. Roschansky,** *Ueber den Einfluß des Funkens auf die oscillatorische Kondensatorentladung. Ann. d. Phys. (4)* **36,** *281, 1911.* — **W. Rihl,** *Ueber die Schallintensität des tönenden Lichtbogens. Ann. d. Phys. (4)* **36,** *647, 1911.* — **J. Zenneck,** *Die Verwertung des Luftstickstoffes mit Hilfe des elektr. Flammenbogens. Leipzig 1911.* — **A. Hagenbach,** *Ueber die verschiedenen Formen des Kupfer- und Eisenbogens. Physik. Zeitschr.* **12,** *1015, 1911.*

H. Th. Simon.

Lichtbrechung.

1. Verhalten des Lichtes an der Trennungsfläche zweier Medien. 2. Das Snelliussche Brechungsgesetz. 3. Reziprozitätsgesetz. Relativer und absoluter Brechungsquotient. 4. Größe der Ablenkung bei einmaliger Brechung. 5. Ablenkung beim Durchgang durch eine planparelle Platte. 6. Ablenkung beim Durchgang durch ein Prisma. 7. Minimum der Ablenkung. 8. Strahlengang im rechtwinkligen Prisma (Totalreflexion, Goniometerprisma). 9. Herleitung des Brechungsgesetzes aus Huygens Theorie der einhüllenden Flächen. 10. Eine andere Deutung des Brechungsgesetzes. Satz von Fermat. 11. Gebogene Lichtstrahlen. 12. Astronomische und terrestrische Refraktion. 13. Fata morgana. 14. Kummers Theorie der Strahlenbrechung in der Atmosphäre verschiedener Planeten. 15. Schmidts Sonnentheorie. 16. Beziehung zwischen Brechungsquotient und Dielektrizitätskonstante. Maxwellsche Beziehung. 17. Brechung des Lichtes an einer Kugelfläche. 18. Konstruktion des durch eine Kugelfläche gebrochenen Strahles. 19. Brechung an einer kontinuierlich gekrümmten Fläche. 20. Optische Weglänge. Gleichung der Wellenfläche. 21. Erweiterung des Fermatschen Prinzips der schnellsten Ankunft. 22. Satz von Malus. 23. Aberrationsfreie Flächen. Cartesische Ovale. 24. Die Diakaustik als Evolute der Wellenfläche. 25. Beobachtung eines im Wasser leuchtenden Objekts. 26. Sturmscher Satz. Astigmatismus enger Strahlenbüschel. 27. Experimenteller Nachweis von Astigmatismus.

1. Verhalten des Lichtes an der Trennungsfläche zweier Medien. Die von einer Lichtquelle ausgehende Lichtstrahlung breitet sich in einem und demselben homogenen Medium (z. B. Luft von überall gleicher Dichtigkeit, Temperatur und Zusammensetzung) auf immer größeren Kugelflächen aus. Die Energieströmung ist radial gerichtet, als ob von der Lichtquelle Energie nach allen Seiten in Gestalt von „Lichtstrahlen" ausgesendet würde. Kommt einem einzelnen Lichtstrahl auch keine reale Existenz zu, so wollen wir doch für unsere Betrachtungen annehmen, daß wir es mit realen Lichtstrahlen zu tun haben, die wir durch geometrische gerade Linien darstellen können. Sobald ein Lichtstrahl auf die Trennungsfläche zweier Medien (etwa Luft und Wasser) auftrifft, wird sein weiterer Verlauf geändert, sei es in bezug auf Richtung oder in bezug auf die Geschwindigkeit seiner Fortpflanzung oder in bezug auf Richtung und Fortpflanzungsgeschwindigkeit.

Im allgemeinen wird die vom Lichtstrahl mitgeführte Energie in zwei Teile gespalten. Ein Teil wird in das ursprüngliche Medium a (Fig. 1) zurückgeworfen (reflektiert), ein anderer Teil dringt in das zweite Medium b ein. Eine Trennungsfläche zwischen zwei Medien ist also zugleich eine „spiegelnde" und „brechende" Fläche. Eine absolut spiegelnde oder „total reflektierende" Fläche ist eine solche, an welcher die ganze auffallende Lichtenergie zurückgeworfen wird; freilich tritt dies erst ein, nachdem die Energie eine gewisse, wenn auch sehr kleine Strecke in das zweite Medium eingedrungen war. Im Gegensatz hierzu geht die Brechung niemals ohne Reflexionsverlust vor sich; ebenso ist sie stets mit einem Energieverlust durch „Absorption" verbunden, da es absolut durchlässige Medien nicht gibt. Im folgenden sehen wir von der Absorption und ebenso von der mit ihr eng verbundenen „Dispersion" oder Farbenzerstreuung ab. Wir verfolgen also nur den Verlauf der in das zweite Medium eindringenden Strahlen, welche von einfarbigem oder homogenem Lichte ausgegangen sind. Mit dem Verlauf der zurückgeworfenen Lichtenergie beschäftigt sich die „Reflexion des Lichtes" (vgl. den Artikel „Lichtreflexion"), während die „Lichtbrechung" den Verlauf der eindringenden Lichtenergie verfolgt.

Je nachdem die Trennungsfläche „glatt" oder „rauh" ist, haben wir es mit „regelmäßiger" oder „diffuser" Ausbreitung der Lichtenergie im zweiten Medium zu tun. Bei der regelmäßigen Brechung hängt die Rich-

tung des gebrochenen Strahles nur von der Richtung des einfallenden ab; bei der diffusen Brechung wird die eindringende Energie bei jeder Einfallrichtung mehr oder weniger nach allen Richtungen gebrochen.

„Durchscheinend" werden die durchlässigen Medien, wenn in ihrem Innern fremde Partikelchen (Partikelchen eines anderen Mediums) eingelagert sind, an denen diffuse Reflexion und Beugung stattfindet. Beispiele solcher „trüben" Medien sind Milch, Milchglas usw. Wir sehen von solchen Medien hier ebenfalls ab.

2. Das Snelliussche Brechungsgesetz. Es falle Strahl lm (Fig. 1) auf die ebene Trennungsfläche rs zwischen den Medien a und b. Die bei m auf der Trennungsfläche errichtete Senkrechte p'mp heißt das „Einfallslot"; die durch den einfallenden Strahl lm und das Einfallslot p'mp gelegte Ebene heißt die „Einfallsebene". Dann gilt zunächst, daß der gebrochene Strahl mq ebenfalls in der Einfallsebene verläuft. Bezeichnen wir die durch den gebrochenen Strahl mq und das Einfallslot p'mp gelegte Ebene als „Brechungsebene", so können wir also sagen:

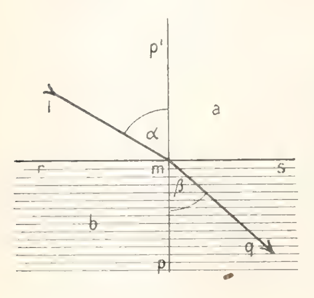


Fig. 1.

Die Brechungsebene fällt stets mit der Einfallsebene zusammen.

Bezeichnen wir ferner den spitzen Winkel lmp', welchen der einfallende Strahl mit dem Einfallslot bildet, mit α und den dazugehörigen spitzen Winkel qmp, welchen der gebrochene Strahl mit dem Einfallslot bildet, mit β, so gilt ferner für jeden Einfallswinkel:

Der Sinus des Einfallswinkels steht zum Sinus des Brechungswinkels in konstantem Verhältnis, welches nur von der Natur der beiden Medien abhängt.

Der Wert dieses Verhältnisses ändert sich bei zwei bestimmten Medien mit der Farbe des Lichtes, so daß unter Umständen ein weißer auffallender Lichtstrahl in seine homogenen Bestandteile zerlegt wird (vgl. den Artikel „Lichtdispersion").

In mathematischer Einkleidung kann das Brechungsgesetz geschrieben werden

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \text{konst.} \ldots\ldots\ldots\ldots 1)$$

Die Konstante heißt der „Brechungsquotient" der beiden Medien a und b; statt Brechungsquotient sagt man auch „Brechungsindex" oder „Brechungsexponent". Sein Wert variiert mit der Farbe oder Wellenlänge des einfallenden Lichtes. Die Bezeichnung „Brechungsquotient" ist vorzuziehen, weil er nichts anderes bedeutet als das Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes im Medium a zu derjenigen im Medium b (s. unter 12).

Schon Ptolemäus (70 n. Chr.) hat nach dem Brechungsgesetz gesucht; als Entdecker ist Snellius (1626) anzusehen, weshalb man das Brechungsgesetz auch kurz als das „Snelliussche Gesetz" bezeichnet. Erst seit Entdeckung dieses allen dioptrischen Erscheinungen zugrunde liegenden Fundamentalgesetzes blühte die geometrische Optik auf.

3. Reziprozitätsgesetz. Relativer und absoluter Brechungsquotient. Die Erfahrung lehrt, daß bei der Brechung der einfallende und der gebrochene Strahl miteinander insofern vertauscht werden können, als ein im Medium b einfallender Strahl qm (Fig. 1) längs ml im Medium a gebrochen wird.

Geht also das Licht von l über m nach q, so muß umgekehrt das von q nach m gegangene Licht von m nach l gehen. Dieses allen Erscheinungen der Brechung (und auch der Reflexion) zugrunde liegende Gesetz wird als das „Reziprozitätsgesetz" oder das „Prinzip der Umkehrbarkeit der optischen Wege" bezeichnet. Man muß daher von einem relativen Brechungsquotienten sprechen zwischen zwei Medien a und b, der verschieden ist, je nachdem das Licht von a nach b oder von b nach a geht. Ist $\sin\alpha/\sin\beta$ der Brechungsquotient für die beiden Medien a und b falls der Strahl von a nach b geht, so ist $\sin\beta/\sin\alpha$ der Brechungsquotient beider Medien, wenn der Strahl von b nach a gebrochen wird. Man bezeichnet den relativen Brechungsquotienten zweier Medien a und b allgemein mit n_{ab} wenn das Licht von a nach b gebrochen wird mit n_{ba} im umgekehrten Falle. Es ist demnach:

$$n_{ab} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \quad \text{und} \quad n_{ba} = \frac{\sin\beta}{\sin\alpha}$$

oder

$$n_{ab} \cdot n_{ba} = 1 \quad \ldots\ldots\ldots 2)$$

Kennt man die relativen Brechungsquotienten n_{ac} und n_{bc} zweier Medien a und b relativ zu einem dritten Medium c, so ist dadurch auch der relative Brechungsquotient n_{ab} der beiden Medien a und b gegeben, insofern gilt (s. unter 5):

$$n_{ab} = \frac{n_{ac}}{n_{bc}} = \frac{n_{cb}}{n_{ca}} \quad \ldots\ldots 3)$$

Ist z. B. a Wasser, b Glas und c Luft, so ist laut experimenteller Bestimmung:

$n_{ca} = {}^4/_3$ oder $n_{ac} = {}^3/_4$; $n_{cb} = {}^3/_2$ oder $n_{bc} = {}^2/_3$ und $n_{ab} = {}^9/_8$ oder $n_{ba} = {}^8/_9$.

Tatsächlich lehrt Formel 3:

$$n_{ab} = \frac{n_{ac}}{n_{bc}} = \frac{{}^3/_4}{{}^2/_3} = \frac{9}{8}$$

$$n_{ab} = \frac{n_{cb}}{n_{ca}} = \frac{{}^3/_2}{{}^4/_3} = \frac{9}{8}.$$

Durch die Gleichung 3 ist die Zahl der möglichen Brechungsquotienten bedeutend verringert und auf eine einzige Reihe zurückgeführt, wenn man die relativen Brechungsquotienten aller Medien in bezug auf ein Medium bestimmt hat, welches man willkürlich wählen kann. Man hat als solches den absolut leeren Raum oder das Vakuum gewählt d. h. das den leeren Raum ausfüllende hypothetische Medium „Lichtäther“, „Weltäther“ oder kurz „Aether“. Man bezeichnet den Brechungsquotienten eines Mediums a gegenüber dem Medium „Aether“ als den „absoluten“ Brechungsquotienten des Mediums a und bezeichnet ihn für den Fall, daß das Licht aus dem Aether in das Medium hineingebrochen wird mit n_a. Wird im Falle dreier Medien a, b und c der Aether als das dritte Medium c eingeführt, so erhalten wir demnach:

$$n_{ca} = n_a \text{ und } n_{cb} = n_b$$

also laut Beziehung 3)

$$n_{ab} = \frac{n_{cb}}{n_{ca}} = \frac{n_b}{n_a} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \quad \ldots 4)$$

$$\text{oder: } n_a \sin\alpha = n_b \sin\beta \quad \ldots\ldots 5)$$

Laut Gleichung 4 ist also der relative Brechungsquotient zweier Medien a und b gleich dem Quotienten der absoluten Brechungsquotienten beider Medien. Gleichung 5 sagt in Worten aus:

Das Produkt aus dem absoluten Brechungsquotient einer Substanz und dem Sinus des Einfallswinkels bleibt bei der Brechung von Medium zu Medium konstant (Invariante).

Ist $n_a > n_b$, so ist $\beta > \alpha$; ist $n_a < n_b$, so muß $\beta < \alpha$ sein. Geht der Lichtstrahl aus einem schwächer brechenden Medium in ein stärker brechendes über, so wird derselbe dem Einfallslote genähert, im umgekehrten Falle vom Einfallslote entfernt. Man sagt, ein Mittel hat größere optische Dichtigkeit oder ist optisch dichter als das andere, wenn es den größeren absoluten Brechungsquotienten hat. Damit ist aber keineswegs gesagt, daß ein optisch dichteres Medium auch dichter im mechanischen Sinne sei d. h. das größere spezifische Gewicht habe. So z. B. ist Benzol stärker brechend, also „optisch dichter“ als Wasser, jedoch von geringerem spezifischen Gewicht als Wasser.

Da der Brechungsquotient zweier Medien a und b gleich dem Verhältnis der Fortpflanzungsgeschwindigkeiten in beiden Medien ist, so sagt der absolute Brechungsquotient eines Mediums aus, wievielmal schneller das Licht sich im Aether fortpflanzt als in dem betreffenden Medium. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Aether beträgt für Licht jeder Wellenlänge („Farbe“) 300 000 km pro Sekunde.

4. Größe der Ablenkung bei einmaliger Brechung. Totalreflexion. Ein senkrecht auf die Trennungsfläche rs (Fig. 2) auffallender Strahl p'm geht ungebrochen längs mp weiter; jeder schief einfallende Strahl lm erleidet eine Richtungsänderung, die um so größer ist, je größer der Einfallswinkel ist. Den Winkel xmq zwischen der Verlängerung mx des einfallenden Strahls und dem gebrochenen Strahl mq bezeichnet man als die „Ablenkung“ δ des Strahls. Es ist $\delta = \alpha - \beta$, wo der zu α gehörige Brechungswinkel β mit Hilfe des Brechungsquotienten $n_{ab} = \sin\alpha/\sin\beta$ zu berechnen ist. Es wächst die Ablenkung δ ungleich schneller als der Brechungswinkel β.

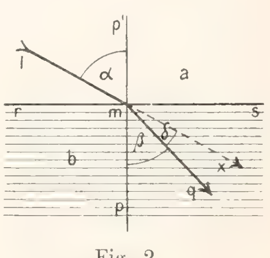


Fig. 2.

Für $\alpha = 90^0$ wird $n_{ab} = 1/\sin\beta$ oder $\sin\beta = 1/n_{ab}$; es wird also β nur reell, wenn $n_{ab} > 1$ ist, d. h. wenn, wie in Figur 2, das Licht aus dem optisch dünneren in das optisch dichtere Medium gebrochen wird. Im umgekehrten Falle kommt dem streifend einfallenden Strahl kein gebrochener Strahl zu (Totalreflexion s. unter 6 und 8).

5. Ablenkung beim Durchgang durch eine planparallele Platte. Es seien drei Medien a, b und c (Fig. 3) durch parallele Trennungsflächen begrenzt. Konstruiert

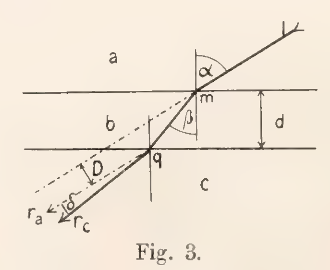


Fig. 3.

man mit Hilfe des Brechungsgesetzes zu dem einfallenden Strahl lm nacheinander den gebrochenen Strahl, so erkennt man, daß jeder schief einfallende Strahl eine Ablenkung $\delta = r_a q r_c$ erfährt. Nur in dem

Spezialfalle, daß die Medien a und c identisch sind (Glasplatte in Luft), tritt der Strahl parallel zum einfallenden aus. In Figur 3 entspricht der austretende Strahl qr_c dem Falle, daß c optisch dichter als a, aber optisch dünner als b ist; der punktierte Strahl qr_a entspricht dem Spezialfall, daß c und a gleiche, aber geringere Dichtigkeit haben als b. In diesem Falle erleidet der austretende Strahl nur eine Parallelverschiebung gegenüber dem eintretenden Strahl. Bezeichnen wir den senkrechten Abstand zwischen dem verlängerten Strahl lm und dem zugehörigen austretenden Strahl qr_a mit D und die Plattendicke mit d, so gilt

$$D = \frac{d \sin(\alpha - \beta)}{\cos \beta} \quad \ldots\ldots 6)$$

und $$n_{ab} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta};$$

die seitliche Verschiebung D ist also für jeden Einfallswinkel proportional der Plattendicke d und wächst mit wachsendem Einfallswinkel.

Auch wenn der Lichtstrahl durch beliebig viele parallel begrenzte Medien geht, von denen das erste und letzte den gleichen absoluten Brechungsquotienten haben, hat laut Erfahrung der Lichtstrahl im ersten und letzten Medium die gleiche Richtung. Mit Hilfe dieser Tatsache kann man die Beziehung 3 im § 3 herleiten.

6. Ablenkung beim Durchgang durch ein Prisma. Unter einem „Prisma" versteht man ein von zwei ebenen, gegeneinander geneigten, Flächen rs und r's' (Fig. 4) begrenztes Medium. Die Kante des Prismas ist die Gerade, in welcher sich die beiden Flächen rs und r's' schneiden oder genügend verlängert, schneiden würden. Die der Kante gegenüberliegende Fläche rr' ist die Basis des Prismas. Derjenige Winkel, welchen die Prismenflächen rs und r's' miteinander bilden, heißt der brechende Winkel. Den Durchschnitt des Prismas mit einer auf der brechenden Kante senkrechten Ebene nennt man den Hauptschnitt des Prismas.

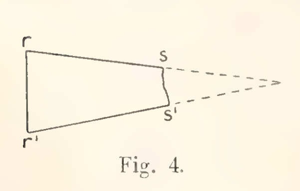


Fig. 4.

Wir betrachten den Strahlengang zunächst nur in der Ebene des Hauptschnitts ABC (Fig. 5), welche mit der Papierebene zusammenfalle. Wir konstruieren zu einem beliebigen, schief einfallenden Strahl lm den zugehörigen austretenden Strahl pq gemäß sukzessiver Anwendung des Brechungsgesetzes. Um die Ablenkung δ zu finden, verlängern wir beide Strahlen. Führen wir die Bezeichnungen gemäß der Figur 5 ein, so gilt

$$n_{ab} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha'}{\sin \beta'}$$

$$\varrho = \beta + \beta'$$

und $$\delta = \alpha + \alpha' - \varrho \quad \ldots\ldots\ldots 7)$$

Es läßt sich folgern, daß der im Innern des Prismas verlaufende Strahl bei p total reflektiert wird, wenn der brechende Winkel ϱ kleiner als der doppelte Betrag des Grenz-

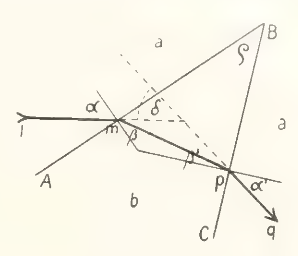


Fig. 5.

winkels der Totalreflexion ist, welcher gegeben ist durch die Gleichung:

$$n_{ab} = \frac{\sin 90^0}{\sin \beta'} = \frac{1}{\sin \beta'}$$

oder $$\sin \beta' = \frac{1}{n_{ab}}.$$

Für $n_{ab} = 4/3$ (Wasser) oder $3/2$ (Glas) wird $\beta' = 48^0\ 45'$ oder $41^0\ 49'$; also tritt bei einem Wasserprisma oder Glasprisma der Strahl nicht mehr aus dem Prisma aus, wenn der brechende Winkel $\varrho = 97^0\ 30'$ oder $83^0\ 38'$ beträgt.

Ferner ergibt eine leichte Rechnung die folgende Beziehung zwischen Einfallswinkel α, Austrittswinkel α', brechendem Winkel ϱ und Brechungsquotient n_{ab}:

$$\sin \alpha' = \sin \varrho \sqrt{n^2_{ab} - \sin^2 \alpha} - \sin \alpha \cos \varrho \ldots 8)$$

aus welcher der Wert von n_{ab} zu berechnen ist, wenn α, α' und ϱ bestimmt sind.

7. Minimum der Ablenkung. Besonders einfach wird der Strahlengang und damit die experimentelle Bestimmung des Bre-

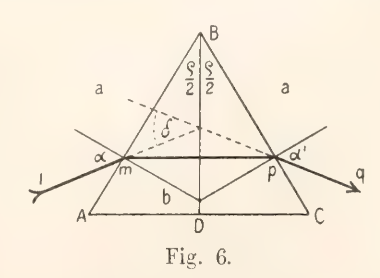


Fig. 6.

chungsquotienten für den Spezialfall, daß der Austrittswinkel α' (Fig. 6) gleich dem Einfallswinkel α wird. In diesem Falle er-

reicht die Ablenkung $\delta = \alpha + \alpha' - \varrho$ ihren kleinsten Wert und man spricht von einem „Minimum der Ablenkung". Dieser Fall tritt ein, wenn der im Innern verlaufende Strahl mp senkrecht steht auf der Halbierungslinie BD des brechenden Winkels ϱ d. h. wenn der Lichtstrahl symmetrisch zur Winkelhalbierenden BD verläuft. Dieser „symmetrische" Strahlengang läßt sich experimentell sehr genau verwirklichen. Für ihn gilt die Beziehung:

$$n_{ab} = \frac{\sin \frac{\delta + \varrho}{2}}{\sin \frac{\varrho}{2}} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots 9)$$

wo ϱ den brechenden Winkel des Prismas und δ das Minimum der Ablenkung bedeuten. Mithilfe eines Spektrometers lassen sich beide Werte ϱ und δ sehr genau bestimmen. Man benutzt daher Formel 9 meist bei Bestimmung des relativen Brechungsquotienten einer Prismensubstanz zu Luft und berechnet daraus mit Hilfe des relativen Brechungsquotienten zwischen Luft und Aether ihren absoluten Brechungsquotienten.

Von dem Vorhandensein eines Minimums der Ablenkung überzeugt man sich leicht experimentell; man läßt die horizontal vom Heliostaten kommenden Sonnenstrahlen auf das im dunklen Zimmer vertikal stehende Prisma auffallen und fängt dieselben nach dem Austritt auf einem weißen Schirm auf. Der hier entstehende Lichtfleck liegt nicht in der Verlängerung der auffallenden Sonnenstrahlen, sondern ist nach der Basis des Prismas zu verschoben. Dreht man das Prisma um eine vertikale Achse, so daß der Einfallswinkel von Null an allmählich wächst, so wandert der Lichtfleck von einer gewissen Lage an entgegengesetzt der Drehungsrichtung nach der Kante des Prismas zu, bleibt einen Moment scheinbar still stehen, kehrt um und wandert wieder rückwärts, von wo er gekommen, im Sinne der Prismendrehung. Während also der Einfallswinkel stetig zunimmt, wird die Ablenkung erst kleiner, erreicht ein Minimum und wächst dann wieder.

Eine sehr einfache Beziehung erhält man auch für den Fall, daß entweder der Einfallswinkel α oder der Austrittswinkel α' gleich Null wird, d. h. daß entweder der Strahl senkrecht eintritt oder senkrecht austritt. Mißt man in diesen Fällen die Ablenkung δ und den brechenden Winkel ϱ, so folgt:

$$n_{ab} = \frac{\sin(\delta + \varrho)}{\sin \varrho} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots 10)$$

Abbe macht von diesem Strahlengang bei seinem Spektrometer mit „Autokollimation" Gebrauch, indem er ein Prisma ABD (Fig. 6) vom brechenden Winkel $\frac{\varrho}{2}$ anwendet und den Strahl an BD senkrecht in sich zurückspiegeln läßt.

8. Strahlengang im rechtwinkligen Prisma. Totalreflexion. Goniometerprisma. Es sei ABC (Fig. 7) der Hauptschnitt eines rechtwinkligen, gleichschenkligen Prismas aus Glas vom Brechungsquotienten gegen Luft $n_{ab} = {}^3/_2$, für welchen der Grenzwinkel der Totalreflexion 41° 49′ beträgt. Alle die Fläche BC unter größerem Winkel erreichenden Strahlen treten also nicht mehr aus, sondern werden total ins Innere zurückgespiegelt.

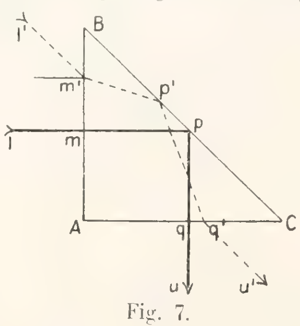


Fig. 7.

Dies tritt schon für den senkrecht auf AB auffallenden Strahl lm ein, da er Fläche BC unter einem Einfallswinkel von 45° trifft. Erst recht gilt dies von den schiefer einfallenden Strahlen l′m′. Alle diese Strahlen treten aus der Prismenfläche AC in einer Richtung aus, die symmetrisch ist zu dem im Punkte p oder p′ auf BC errichteten Lot. Dabei verläßt ein weißer einfallender Strahl das Prisma wieder als weißer Strahl, insofern die bei m′ eintretende Dispersion durch die gleichgroße, aber entgegengesetzte Dispersion bei q′ rückgängig gemacht wird. Man benutzt daher das rechtwinklige Prisma als Spiegel, um ohne Energieverlust nahe parallel einfallenden Strahlen eine andere Richtung zu erteilen (Totalreflektierender Prisma).

Ein interessanter und für die Geodäsie wichtiger Spezialfall ist in Figur 8 skizziert. Trifft der schiefe Strahl l′m′ das Prisma nahe der Kante A (Fig. 8), so wird er schon an der Fläche AC bei o′ total reflektiert, an der Fläche BC bei p′ teilweise reflektiert und tritt bei q′ in einer Richtung q′u′ aus, die mit der verlängerten Einfallsrichtung l′m′ einen rechten Winkel einschließt. Dieser Strahlengang bleibt erhalten, auch wenn man das Prisma um seine Kante A ein wenig dreht, vorausgesetzt, daß der Winkel des Prismas bei A genau 90° und derjenige bei B und C genau 45° beträgt. Man hat also ein Mittel, um die Richtigkeit dieser Winkel zu prüfen, indem man längs u′q′ visiert und zusieht, ob bei einer Drehung

des Prismas um seine brechende Kante das anvisierte Objekt l' still stehen bleibt. In diesem Falle kann man also rechte Winkel im Raume abstecken, indem man ein längs u'q' direkt anvisiertes Objekt zur Koinzidenz mit dem längs u'q'p'o'm'l' gesehenen Objekte l' bringt.

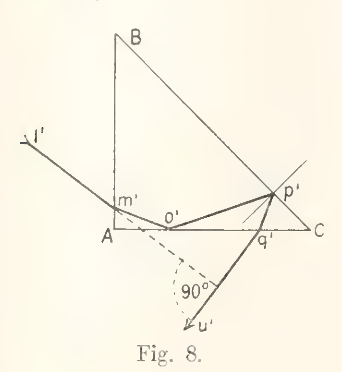


Fig. 8.

9. Herleitung des Brechungsgesetzes aus Huygens Theorie der einhüllenden Flächen. Das Snelliussche Brechungsgesetz ist auf empirischem Wege gefunden worden. Der erste, welcher es auf wellentheoretischem Wege abzuleiten verstand, war Huygens, dem wir die Einführung des Lichtäthers verdanken. Nach ihm kann man die von einem Lichtstrahl getroffene Stelle A (Fig. 9) der Grenzfläche rs zwischen zwei Medien a und b auffassen als neues Er-

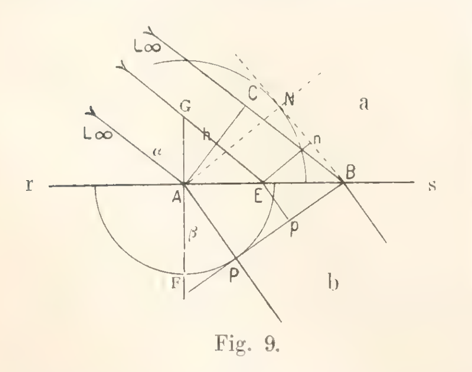


Fig. 9.

schütterungszentrum, von welchem Elementarwellen nach allen Seiten fortschreiten, sowohl in das Medium a zurück wie in das Medium b hinein. Liegt der leuchtende Punkt L∞ im Unendlichen, so kommen parallele Strahlen, deren Wellenfläche (s. unter 20) eine Kugelfläche von unendlich großem Radius ist, also als Senkrechte AC auf der Strahlenrichtung LA aufgefaßt werden kann. Die vom unendlich fernen Lichtpunkt ausgegangenen Strahlen erreichen somit die Gerade AC zu gleicher Zeit; es ist also AC die ebene Wellenfläche zu den einfallenden parallelen Strahlen. Während der Strahl LC im Medium a weiterschreitet, hat sich von A eine Kugelwelle sowohl in das Medium a als auch in das Medium b ausgebreitet. Verhält sich die Geschwindigkeit der Fortpflanzung in den Medien a und b wie 4:3, so hat in der gleichen Zeit die von A ausgegangene Kugelwelle im Medium a den Radius 4 erreicht, wenn sie im Medium b den Radius 3 erreicht hat. Wie weit haben sich beide Kugelwellen während der Zeit ausgebreitet, in welcher das Licht von C nach B gegangen ist? Im Medium a bis zu einer Kugelfläche vom Radius AN = BC und im Medium b bis zu einer Kugelfläche vom Radius AP = $^3/_4$ BC. In der gleichen Zeit hat sich demnach von einem Punkte E eine Kugelwelle vom Radius En ins Medium a und eine solche vom Radius Ep = $^3/_4$ En im Medium b ausgebreitet.

Nach Huygens „Prinzip der einhüllenden Flächen" erhält man die neue Wellenfläche nach der Brechung, indem man von B aus eine Tangentialebene an alle im Medium b von A, E usw. eindringenden Elementarkugelwellen legt. Die Tangentialebene BP ist also Wellenfläche zu den gebrochenen Strahlen, die senkrecht zu BP in geraden Linien weitergehen. Ebenso ist die von B an die Elementarkugelwellen im Medium a gelegte Tangentialebene BN Wellenfläche zu den reflektierten Strahlen und die reflektierten Strahlen schreiten senkrecht zu BN im Medium a fort.

Mit Hilfe dieser Ueberlegungen konnte Huygens die Gesetze der Reflexion und Brechung herleiten. Uns interessiert hier nur die Brechung. Aus der Figur folgt ohne weiteres:

$$\frac{\sin BAC}{\sin ABP} = \frac{BC}{AP} = \frac{\sin GAL}{\sin PAF} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

Es ist also das Verhältnis $\sin\alpha/\sin\beta$ gleich dem Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten BC/AP in den Medien a und b und somit eine Konstante, homogenes Licht vorausgesetzt. In dem von uns gewählten Falle ist für Licht mittlerer Wellenlänge BC/AP = 4/3, also ist auch $\sin\alpha/\sin\beta = 4/3$. Nun wissen wir, daß beim Uebergang eines Lichtstrahls von Luft in Wasser das Verhältnis $\sin\alpha/\sin\beta = 4/3$ ist; also haben wir mit Hilfe des Huygensschen Prinzips zugleich das wichtigste Resultat erhalten, daß das Licht im Wasser sich langsamer fortpflanzt als in Luft. Allgemein: Alle Medien, deren absoluter Brechungsquotient größer als Eins ist, pflanzen das Licht langsamer fort als der Aether oder der absolut leere Raum. Solche Medien brechen das Licht dem Lote zu, sind also optisch dichtere Medien als der Aether. Das Experiment bestätigt diese von Huygens gezogene theoretische Schlußfolgerung. Bekanntlich hatte Newton aus

seiner Emissionstheorie das Gegenteil gefolgert. Somit war die Huygenssche Wellenlehre als die leistungsfähigere Hypothese erwiesen. Ihre eigentliche Stütze erhielt sie erst, als Fresnel das Huygenssche Prinzip der Elementarwellen mit dem Youngschen Interferenzprinzip verknüpfte und die „Interferenz der Elementarwellen" einführte. Eine strenge Formulierung des „Fresnel-Huygensschen Prinzips" hat G. Kirchhoff gegeben. Mit Hilfe dieses Kirchhoffschen Prinzips kann man aus den Hypothesen der Undulationstheorie die Reflexions- und Brechungsgesetze ziemlich streng herleiten (vgl. den Artikel „Lichtbeugung").

10. Eine andere Deutung des Brechungsgesetzes. Satz von Fermat. Schon vor Huygens war es Fermat gelungen, dem Brechungsgesetz eine tiefere theoretische Bedeutung zu geben. Im Jahre 1662 hatte Lachambre bewiesen, daß bei der Reflexion an einem ebenen Spiegel ein Lichtstrahl stets denjenigen Weg wählt, um unter Vermittelung des Spiegels von einem Punkt zu einem anderen vorgeschriebenen Punkte zu gelangen, welchen er in der kürzesten Zeit zurücklegt, und daß dieser Weg der durch das Reflexionsgesetz vorgeschriebene Weg ist. Nach Fermat schlägt auch der gebrochene Strahl den zeitlich kürzesten Weg ein, um von einem Punkte des einen Mediums nach einem vorgeschriebenen Punkte des zweiten Mediums zu gelangen, wenn beide Medien durch eine ebene Trennungsfläche getrennt sind. Bei der Reflexion an einem ebenen Spiegel ist der vom Lichtstrahl eingeschlagene Weg auch räumlich der kürzeste; bei der Brechung an ebener Trennungsfläche ist der vom Lichtstrahl zurückgelegte Weg nur zeitlich, nicht aber auch räumlich der kürzeste.

Eine deutlichere Vorstellung vom Wesen des Fermatschen Theorems für den Fall der Brechung gibt uns folgende Aufgabe.

Es sei rs in Figur 10 ein schmaler, geradliniger Kanal auf freiem Felde. Ein in A

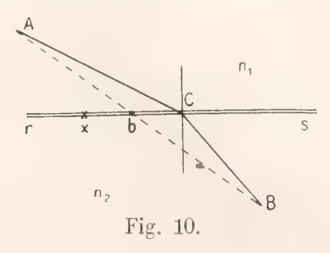


Fig. 10.

befindlicher Mann soll in der kürzesten Zeit nach einem beliebigen Punkte x am Kanale und von dort nach B eilen. Es werde angenommen, daß das Terrain jenseits der Linie rs unwegsamer sei, so daß deshalb die Geschwindigkeit von rs an auf ein Drittel reduziert werde. Es soll also der geeignetste Punkt C zum Ueberschreiten der Linie rs gesucht werden, für welchen die Zeitdauer auf beiden Wegstrecken AC + CB am kleinsten ist.

Zunächst ist einleuchtend, daß die gerade Verbindung AbB, welche den kürzesten Weg darstellt, diesmal nicht mehr zugleich der schnellste Weg ist, wenn nicht zufällig AB senkrecht auf rs zu liegen kommt. Rückt man nämlich den Durchschneidungspunkt b allmählich in der Richtung gegen s, so wird die Summe der Wege Ab + bB zwar größer, aber während die schneller passierbare Strecke Ab zunimmt, wird die schwieriger passierbare Strecke bB kürzer. Der letztere Vorteil überragt den ersteren Nachteil. Rückt man den Punkt b immer weiter, so kommt er endlich in eine Lage C, von wo an umgekehrt die Zeitversäumnis infolge der Verlängerung von AC überwiegend werden würde über die Zeitersparnis infolge der Verkürzung von CB. Eine genauere Diskussion lehrt, daß man am schnellsten zum Ziele kommt, wenn man dem Brechungsgesetz folgt.

11. Gebogene Lichtstrahlen. „Gebogene" oder „gekrümmte" Lichtstrahlen kommen zustande, wenn Lichtstrahlen in einem inhomogenen Medium verlaufen, dessen Brechungsquotient von Stelle zu Stelle kontinuierlich zu- oder abnimmt. Man nennt ein solches inhomogenes Medium ein „geschichtetes" Medium.

Zum leichteren Verständnis denken wir uns zunächst eine ganze Anzahl planparalleler Platten übereinander geschichtet, deren Brechungsquotient von Platte zu Platte abnimmt. Bei der in Figur 11 eingeführten

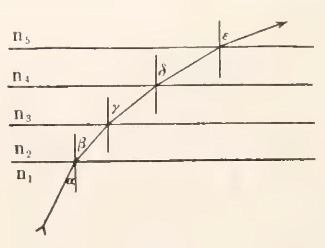


Fig. 11.

Bezeichnungsweise gilt auf Grund des Snelliusschen Brechungsgesetzes:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$
$$n_2 \sin \beta = n_3 \sin \gamma$$
$$n_3 \sin \gamma = n_4 \sin \delta$$
$$\cdot \; \cdot \; \cdot \; \cdot \; \cdot \; \cdot \; \cdot$$

Ist wie in der Figur $n_2 < n_1$, $n_3 < n_2$, $n_4 < n_2$ usw., so wird $\alpha > \beta > \gamma > \delta$ usw., d. h. der Strahl wird vom Einfallslot immer mehr abgelenkt. Der geknickte Lichtstrahl geht in einen kontinuierlich gebogenen

Strahl über, wenn man die Dicke der Platten verkleinert und ihre Zahl beliebig vermehrt.

Gemäß dieser Konstruktionsart würde ein horizontal einfallender Strahl ($\alpha = 90^0$) in horizontaler Richtung ($\beta = 90^0$ usw.) d. h. parallel zur Trennungsfläche weitergehen. In Wirklichkeit wird aber auch ein horizontal auffallender Strahl von seiner Richtung abgelenkt und zwar nach unten in die stärker brechenden Schichten hinein. Davon kann man sich durch folgendes Experiment überzeugen. Das Glasgefäß ABCD (Fig. 12) werde mit Schwefelkohlenstoff bis zur Höhe h gefüllt; auf diese Schicht werde mit Hilfe eines Hebers vorsichtig eine Schicht mittels Magdalarot gefärbten Alkohols gelagert. Durch Diffusion entsteht dann eine Flüssigkeitsmasse, bei welcher die Dichtigkeit und damit auch der Brechungsquotient von unten nach oben abnimmt.

Läßt man auf dieses geschichtete Medium in horizontaler Richtung einen parallelen Strahlenzylinder s einfallen, so sieht man im verdunkelten Zimmer den weiteren Verlauf des Strahlenbündels durch innere Diffusion deutlich sich abheben. Durch Verschieben des Schirmes pp nach oben oder unten kann man die Einfallshöhe des eintretenden Lichtzylinders beliebig ändern. Der horizontal auffallende Lichtstrahl wird stets nach unten gebogen, wie dies in der Figur angedeutet ist.

Läßt man den Lichtstrahl schief nach oben eintreten, so geht der gebrochene Strahl erst gekrümmt nach rechts oben, biegt um und läuft nach rechts unten; der Strahl beschreibt eine parabelförmige Kurve mit dem Scheitel nach oben gelegen. Die Erklärung und genauere Diskussion der gekrümmten Lichtstrahlen kann nur auf wellentheoretischem Boden gegeben werden, indem man die Veränderung der Wellenfläche nach dem Prinzip von Huygens-Fresnel behandelt.

12. Astronomische und terrestrische Refraktion. Im allgemeinen ist die Erdatmosphäre so geschichtet, daß die Dichte von Kugelfläche zu Kugelfläche kleiner wird, wenn man sich von der Erdoberfläche immer mehr entfernt. Ein von einem Stern oder der Sonne zur Erdoberfläche gehender Lichtstrahl muß somit ein geschichtetes Medium durchlaufen, dessen Brechungsquotient in der Richtung des Strahles kontinuierlich zunimmt. Ein nicht radial gerichteter einfallender Strahl wird also gebogen und zwar mit seiner konvexen Seite nach oben. Der Beobachter sieht das Gestirn von der Erdoberfläche aus in der Richtung der Tangente, welche an den Endpunkt der Kurve des Strahls gezogen ist, also an einem anderen O r t e, als es in Wirklichkeit sich befindet. Der Winkel zwischen dieser Tangente und der Richtung des Strahls außerhalb der Atmosphäre bestimmt die Größe der „Astronomischen Refraktion". Bei der Sonne tritt sie am stärksten auf bei Sonnenaufgang und Sonnenuntergang.

Die „terrestrische Refraktion" bedingt die Aenderung der Geradlinigkeit eines von irdischen Objekten ausgegangenen Lichtstrahls (vgl. den Artikel „A t m o s p h ä r i s c h e O p t i k").

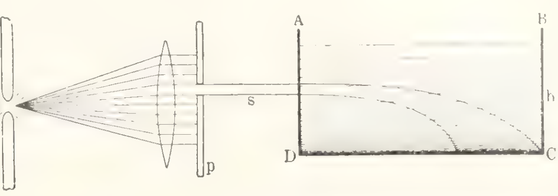


Fig. 12.

13. Fata morgana. An der Erdoberfläche beobachtet man zuweilen einige überaus seltsame Erscheinungen, deren bemerkenswerteste als „Fata morgana" bezeichnet wird. Gegenstände unterhalb des Horizonts oder durch Berge verdeckt, werden sichtbar und umgekehrt verschwinden manchmal Objekte, die unter normalen Verhältnissen sichtbar sind. Es erscheinen Gegenstände gehoben oder gesenkt, vergrößert oder verkleinert oder gar seitlich verschoben. Es erscheinen Objekte verdoppelt, verdreifacht und was wohl das Merkwürdigste ist, zum Teil aufrecht, zum Teil in u m g e k e h r t e r Lage. Alle diese Erscheinungen werden bedingt durch a n o m a l e Schichtung in der Erdatmosphäre (vgl. den Artikel „A t m o s p h ä r i s c h e O p t i k").

W o o d hat 1899 auf künstlichem Wege die Erscheinung der Fata morgana hervorgerufen und dadurch die Erperimentalphysik um ein bezauberndes Experiment bereichert.

14. Kummers Theorie der Strahlenbrechung in der Atmosphäre verschiedener Planeten. Schon 1860 zog K u m m e r aus der von ihm behandelten Theorie der gebogenen Lichtstrahlen folgenden überraschenden Schluß: Wenn nur die Krümmung der Lichtstrahlen groß genug ist, muß man von einem Orte eines Weltkörpers mit geeignet geschichteter, beliebig ausgedehnter Atmosphäre die ganze Oberfläche, ja sogar die Rückseite (Antipode) des Weltkörpers überschauen können. Je nachdem dies möglich ist oder nicht, unterscheidet K u m m e r zwei Klassen von Himmelskörpern: 1. Solche, bei denen der Krümmungsradius ϱ der gebogenen Lichtstrahlen (Fig. 13) k l e i n e r ist als der Kugelradius r des Himmelskörpers (Jupiter) und 2. solche, deren Radius r (Fig. 14) unter allen Umständen unter der

Größe des Krümmungsradius ϱ der möglichen gebogenen Lichtstrahlen bleibt (Erde).

Zur Erläuterung der Figuren sei erwähnt, daß man die größte Krümmung ϱ der Lichtstrahlen erhält, wenn man sich die Grenzfläche MOP gezogen denkt, dessen Stück OP rechts von der geschichteten (Atmosphäre begrenzt wird (ähnlich der Grenzfläche AD in Fig. 12) und alle senkrecht auf OP einfallenden Strahlen einzeln verfolgt. Ist wie in Figur 14 $\varrho > r$, so kann bei normalen Dichteverhältnissen kein vom Oberflächenpunkt Q ausfahrender Strahl wieder die Oberfläche erreichen. Im Falle der Figur 13 dagegen ist $\varrho < r$ und die von Q unter geeignetem Winkel ausfahrenden Strahlen kehren zur Oberfläche zurück. Beim Jupiter tun dies die unter 3° 48′ ausfahrenden Strahlen, wenn man annimmt, daß dessen Atmosphäre nur den 20. Teil der Höhe besitzt, die unserer Erdatmosphäre zukommt.

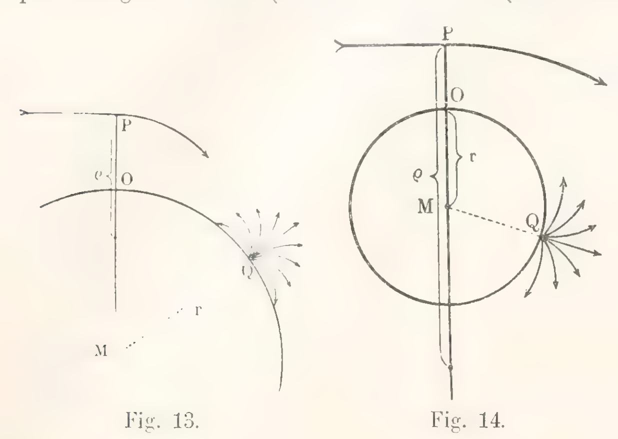


Fig. 13. Fig. 14.

15. Schmidts Sonnentheorie. Eine wichtige Anwendung der Kummerschen Strahlentheorie hat Schmidt in bezug auf die Sonne gemacht. Auf Grund der neueren Strahlungsarbeiten kann die „schwarze“ Temperatur der Sonne auf 6000 Grad geschätzt werden. Bei einer so hohen Temperatur müssen alle auf der Sonne befindlichen Substanzen in dampfförmigem Zustande vorhanden sein. Die Sonne müssen wir uns also als einen Gasball vorstellen, dessen Dichtigkeit von außen nach innen kontinuierlich zunimmt. Wir haben es also bei der Sonne mit einem „geschichteten“ Medium zu tun.

Schmidt diskutiert den Gang der Strahlen, welche vom Sonneninnern ausfahren und den geschichteten Gasball durchlaufen. Natürlich müssen die Strahlen im allgemeinen gekrümmte Wege einschlagen. Nur die radial ausfahrenden Strahlen gelangen auf direktem geradlinigen Wege in unser Auge. Nun gehört die Sonne zweifellos im Sinne Kummers zum Typus des Jupiters, da ihr Radius 108 mal größer ist als der Erdradius und die Dichtigkeit daselbst sicher noch stärker von innen nach außen abnimmt als in der Erdatmosphäre.

Eine Sphäre, die „kritische“ genannt, ist dadurch charakterisiert, daß bei ihr der Krümmungsradius ϱ tangentialer Strahlen (d. h. senkrecht zum Radius MP Figur 13 verlaufender Strahlen) gleich diesem kritischen Sphärenradius ist. Ein daselbst einmal genau tangential verlaufender Strahl würde also diese Sphäre niemals verlassen, sondern dauernd ihre Peripherie umkreisen müssen. Diese kritische Sphäre ist daher die äußere Grenze desjenigen Teiles der Sonne, von welchem aus dem Innern stammende Strahlen nach außen hin noch in nahezu tangentialer Richtung gelangen.

Nach Schmidt ist also der scharfe Sonnenrand keine reale Grenze zwischen einem feurig flüssigen Sonnenkern und der Sonnenatmosphäre, sondern eine optische Täuschung, hervorgebracht durch die Strahlenbrechung im geschichteten Sonnenball.

16. Beziehung zwischen Brechungsquotient und Dielektrizitätskonstante. Maxwellsche Beziehung. Nach Maxwell ist der Aether ein Dielektrikum mit der Dielektrizitätskonstante gleich Eins. Bezeichnen wir mit ε die Dielektrizitätskonstante eines beliebigen dielektrischen Mediums und mit n seinen absoluten Brechungsquotienten, so folgt aus der Maxwellschen elektromagnetischen Lichttheorie (vgl. den Artikel „Strahlende Aetherenergie“) die sogenannte „Maxwellsche Beziehung“, gemäß welcher für alle Wellen gelten muß:

$$n = \sqrt{\varepsilon} = \frac{c}{v} \quad \ldots \ldots \quad 11)$$

wenn mit c bezw. v die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes im Aether bezw. Medium ε bezeichnet wird. In Worten lautet also die Maxwellsche Beziehung: Der absolute Brechungsquotient eines Mediums (Dielektrikums) ist gleich der Wurzel aus der Dielektrizitätskonstanten dieses Mediums.

Tatsächlich stimmt diese Beziehung für Medien, für welche n nahezu unabhängig von der Farbe des Lichtes ist, welche also so gut wie keine Dispersion haben. Zu diesen Medien gehören vor allem die Gase. In folgender Tabelle sind für den Brechungsquotienten verschiedener Gase die Werte für Natriumlicht genommen und für die Dielektrizitäts-

konstante ε der von Boltzmann experimentell gemessene Wert gesetzt:

Substanz	n	$\sqrt{\varepsilon}$
Luft	1,000 294	1,000 295
Wasserstoff	1,000 138	1,000 132
Kohlensäure	1,000 449	1,000 473
Kohlenoxyd	1,000 346	1,000 345
Stickstoffoxydul	1,000 503	1,000 497

Außer bei Gasen erhielt man auch für flüssige Kohlenwasserstoffe eine genügend gute Bestätigung der Maxwellschen Beziehung, während bei vielen festen Körpern und zumal beim Wasser bedeutende Diskrepanzen sich zeigten. Hier entsteht die Frage: welchen Brechungsquotienten soll man der Vergleichung zugrunde legen? Da die Dielektrizitätskonstante eine elektrostatische Größe ist, so kann natürlich nur der Brechungsquotient für unendlich lange Wellen in Frage kommen.

Es kann der Wert dieses Brechungsquotienten aus der Dispersionsformel für das betreffende Dielektrikum abgeleitet oder experimentell unter Benutzung elektrischer Wellen von relativ großer Wellenlänge ermittelt werden. Benutzt man für n_∞ die aus der fünfkonstantigen Dispersionsformel von Ketteler-Helmholtz berechneten Werte für unendlich lange Wellen, so erhält man die folgende Tabelle:

Stoff	n_∞^2	ε
Flintglas	6,77	6,7 —9,1
Flußspat	6,09	6,8 —6,9
Steinsalz	5,18	5,81—6,29
Quarz	4,58	4,55—4,73
Sylvin	4,55	4,94

Noch ein anderes Beispiel für die glänzende Bestätigung der Maxwellschen Beziehung sei angeführt. Die Dielektrizitätskonstante ε des Wassers ist rund gleich 80, also muß nach der Maxwellschen Beziehung der Brechungsquotient für unendlich lange Wellen gleich $\sqrt{80} = 8{,}9$ sein. Tatsächlich ergab die experimentelle Bestimmung des Brechungsquotienten unter Benutzung langer elektrischer Wellen $n = 9$.

17. Brechung des Lichtes an einer Kugelfläche. Es sei die Trennungsfläche zweier Medien a und b (Fig. 15) ein Stück einer Kugelfläche FF mit dem Mittelpunkt M. Um zu dem einfallenden beliebigen Strahl LE den zugehörigen gebrochenen Strahl zu finden, bedenken wir, daß jedes Element einer Kugelfläche als Ebene aufgefaßt werden kann, deren Lage identisch ist mit der beim Element an die Kugelfläche gelegten Tangentialebene. Für den Strahl LE kann die Kugelfläche also ersetzt werden durch die ebene Fläche rs, welche senkrecht auf dem durch E gehenden Kugelradius MEp steht. Wir wissen dann, daß der zu LE gehörige gebrochene Strahl L′E in der Einfallebene verbleibt; diese aber ist identisch mit der durch LE und ME gelegten Ebene, da ja das bei E errichtete Lot Ep auf der Tangentialebene rs die Verlängerung des Kugelradius ME ist. Die Richtung des gebrochenen Strahles EL′ folgt aus dem Brechungsgesetz $n_{ab} = \sin\alpha / \sin\beta$.

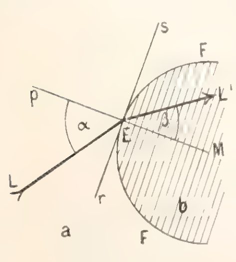


Fig. 15.

Während bei ebenen Trennungsflächen das Einfallslot für alle unter beliebigem Winkel einfallenden Strahlen ein und dieselbe Richtung besitzt, variiert bei der Kugelfläche die Richtung des Einfallslotes von Einfallspunkt zu Einfallspunkt. Stets aber ist es mit dem durch den Einfallspunkt gezogenen Kugelradius identisch. Für Strahlen mit dem Einfallswinkel $\alpha = 0$ wird auch der Brechungswinkel $\beta = 0$, d. h. alle zum Kugelmittelpunkt M zielenden Strahlen gehen ungebrochen durch die kugelförmige Trennungsfläche. (Die Brechung eines von L ausgegangenen Strahlenbüschels siehe im Art. „Abbildungslehre").

18. Konstruktion des durch eine Kugelfläche gebrochenen Strahles. Es sei M (Fig. 16) der Mittelpunkt der brechenden

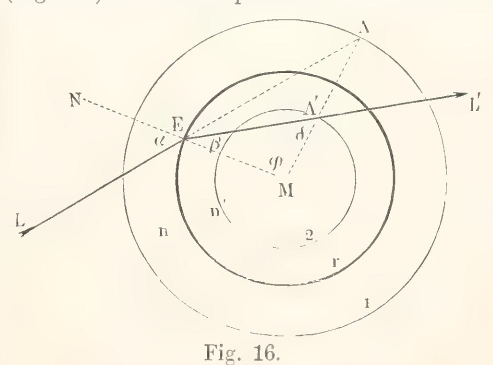


Fig. 16.

Kugel Er vom Radius r und dem absoluten Brechungsquotienten n′, während das umgebende Mittel den absoluten Brechungsquotienten n habe. Um zu dem beliebigen Einfallsstrahl LE den gebrochenen zu finden, schlagen wir nach der eleganten Konstruktionsmethode von Weyerstraß um M die beiden Hilfskreise 1 und 2 mit den Radien

$$r_1 = \frac{n'}{n}\, r \text{ und } = r_2 \frac{n}{n'},\, r \quad \ldots\ldots.. 12)$$

verlängern den Strahl LE bis er in A den Hilfskreis 2 schneidet und verbinden E mit dem Schnittpunkt A′, in welchem sich die Gerade AM und der Hilfskreis 2 schneiden. Die Gerade EA′L′ ist der zu LE ge-

hörige gebrochene Strahl. Gleichzeitig folgt aus dieser Konstruktion, daß alle nach A zielenden Strahlen sich nach der Brechung im Punkte A′ schneiden. Also folgt nach dem Reziprozitätsgesetz (s. unter 3) auch, daß alle im Medium n′ vom Punkte A′ ausfahrenden Strahlen sich nach der Brechung rückwärts verlängert in A schneiden. Diese ausgezeichneten Punkte A und A′ wollen wir als die „aberrationsfreien" Punkte der Kugelfläche bezeichnen (s. unter 25); sie spielen eine Rolle bei der Abbildung durch das Mikroskopobjektiv, zumal bei Verwendung von Immersionssystemen.

19. Brechung an einer kontinuierlich gekrümmten Fläche. Diakaustik. Fällt ein Lichtstrahl LE (Fig. 17) am Punkte E einer kontinuierlich gekrümmten Fläche FF auf dieselbe, so findet man den gebrochenen Strahl auf folgende Weise. Man legt bei E die Tangentialebene rs an die Fläche, errichtet auf ihr in E eine Senkrechte und behandelt diese als Einfallslot. Der gebrochene Strahl verläuft dann in der durch diese Senkrechte und den Einfallstrahl gelegten Ebene und bildet mit der Senkrechten den Winkel β, welcher aus dem Brechungsgesetz $\sin\alpha/\sin\beta = n_{ab}$ folgt. Im Falle der Kugelfläche waren die Lote an den verschiedenen Einfallspunkten E identisch mit den Kugelradien. Hier zielen die Lote nach den verschiedensten Punkten. Für die in der Papierebene verlaufenden Strahlen sind diese identisch mit den Krümmungsmittelpunkten der Schmiegungskreise, die man an die Fläche FF in den Einfallspunkten legen kann, deren Radien mit den Krümmungsradien der Schmiegungskreise identisch sind. Bei jeder brechenden Fläche von kontinuierlicher Krümmung schneiden sich je zwei benachbarte Strahlen in einem Punkte. Die Fläche, welche alle diese Schnittpunkte unendlich benachbarter Strahlen verbindet, wird als die „Diakaustik" der brechenden Fläche bezeichnet im Gegensatz zur „Katakaustik" bei der Spiegelung des Lichtes. Man findet diese Diakaustik, indem man zu allen einfallenden Strahlen die zugehörigen gebrochenen Strahlen nach der oben angegebenen Konstruktionsregel konstruiert. Derartige Konstruktionen findet man in vorzüglicher Weise in den „optischen Tafeln" von Engel und Schellbach durchgeführt.

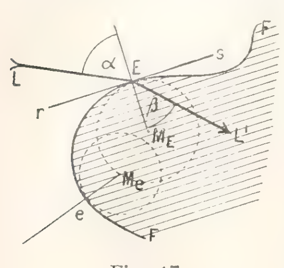


Fig. 17.

20. Optische Weglänge. Gleichung der Wellenfläche. Helmholtz hat den Fermatschen Satz auf beliebig viele Trennungsflächen ausgedehnt (s. unter 20). Um diesen Satz in kurzer Form aussprechen zu können, müssen wir näher auf den Begriff der „optischen Länge" eingehen.

Definition der optischen Länge: Wenn ein Lichtstrahl durch verschiedene brechende Mittel hindurchgeht, und man die Länge seines Weges in jedem einzelnen Mittel mit dem absoluten Brechungsquotient dieses Mittels multipliziert und alle diese Produkte addiert, so nennt man diese Summe die „optische Länge" des Strahles oder seine auf den leeren Raum „reduzierte Länge".

Sind ϱ_1, ϱ_2 usw. (Fig. 18) die Weglängen des Strahles im ersten, zweiten usw. Mittel und n_1, n_2, usw. die zugehörigen absoluten Brechungsquotienten, so ist die optische Länge zwischen AB:

$$R = n_1 \varrho_1 + n_2 \varrho_2 + n_3 \varrho_3 + n_4 \varrho_4$$

$$R = \Sigma n \varrho \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

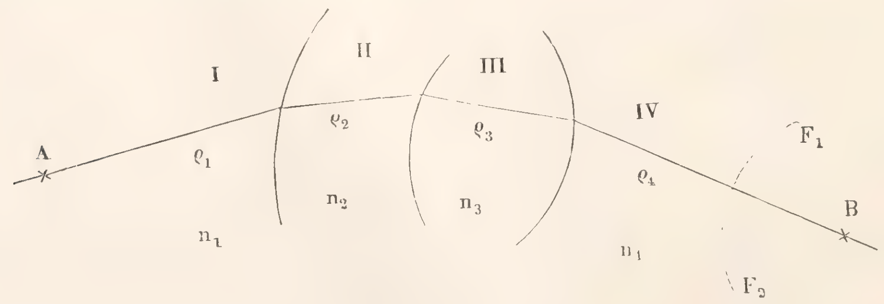


Fig. 18.

Nennen wir die Lichtgeschwindigkeit im leeren Raume c, in dem ersten, zweiten usw. brechenden Mittel dagegen v_1, v_2 usw., so ist bekanntlich:

$$n_1 = \frac{c}{v_1};\ n_2 = \frac{c}{v_2};\ \ldots\ n_4 = \frac{c}{v_4}$$

und
$$R = c \left| \frac{\varrho_1}{v_1} + \frac{\varrho_2}{v_2} + \dots \frac{\varrho_4}{v_4} \right|;$$
die in Klammern stehende Summe ist aber die Zeit, welche das Licht braucht, um vom Anfang A bis zum Ende B des hier betrachteten Weges zu gelangen. Wird dieselbe mit T bezeichnet, so gilt:

$$R = c\,T \quad \dots\dots 14)$$

d. h. es ist die „optische Länge" proportional der Zeit, in der das Licht die Länge des Strahles durchläuft und ist gleich dem Wege, welchen das Licht in derselben Zeit im leeren Raume zurückgelegt haben würde.

Mit Hilfe der „optischen Länge" ist ohne weiteres auch die Gleichung der „Wellenfläche" gegeben. Die „Wellenfläche" ist dadurch definiert, daß auf ihr die Wellenbewegung in bezug auf Phase und Schwingungszustand überall die gleiche ist (vgl. den Artikel „Lichtbeugung"). Für die von einem Punkte ausgegangenen Strahlen ist also nach beliebig vielen Spiegelungen und Brechungen diejenigen Fläche Wellenfläche, welche von den verschiedenen Strahlen in der gleichen Zeit erreicht wird. Da das Licht in gleicher Zeit gleiche optische Längen zurücklegt, so kann man die Wellenfläche auch so definieren: Die Wellenfläche verbindet alle diejenigen Punkte, für welche die optische Länge einen und denselben Wert hat. Die Gleichung einer Wellenfläche lautet demnach:

$$R = \Sigma n \varrho = \text{konst} \dots\dots\dots 15)$$

Für die von einem leuchtenden Punkte A ausgegangenen Strahlen ist die Wellenfläche im ersten Medium eine Kugeloberfläche. Ist die Wellenfläche nach dem Durchgang der Strahlen durch beliebig viele brechende Flächen im letzten Medium wiederum eine Kugelfläche (F_1F_2), dann schneiden sich die Strahlen in einem Punkte. Der Schnittpunkt ist reell oder virtuell, je nachdem die kugelförmige Wellenfläche F_1F_2 im letzten Medium den ankommenden Strahlen ihre konvexe oder konkave Seite zukehrt.

21. Erweiterung des Fermatschen Prinzips der schnellsten Ankunft. Im Abschnitt 10 hatten wir gesehen, daß das Licht bei der Brechung an ebenen Flächen den Weg der schnellsten Ankunft wählt. Mit Hilfe des Begriffs der optischen Länge können wir diesen Satz von Fermat also folgendermaßen aussprechen: Bei der Brechung an ebenen Flächen schlägt der Lichtstrahl denjenigen Weg ein, für welchen die Summe der optischen Längen ein Minimum ist. Wird das Licht an kontinuierlich gekrümmten Flächen gespiegelt oder gebrochen, so ist der nach dem Reflexions- oder Brechungsgesetz eingeschlagene Weg nicht immer derjenige, auf welchem das Ziel am schnellsten erreicht wird. In diesem Falle muß der Fermatsche Satz erweitert werden. Er lautet: Die optische Länge zwischen einem Punkte des Strahls im ersten Medium und einem Punkte im zweiten Medium ist ein Extremwert (Maximum oder Minimum), d. h. sie weicht von der optischen Länge aller, dem tatsächlichen Wege unendlich benachbarten Wege höchstens um Glieder zweiter Ordnung ab. Oder es muß, mathematisch gesprochen, gelten:

$$\delta \Sigma n \varrho = 0 \dots\dots\dots\dots 16)$$

wenn wir die Aenderung erster Ordnung durch ein vorgesetztes δ (Variationszeichen) andeuten. Das Verschwinden der ersten Variation sagt aber aus, daß die optische Länge sowohl ein Minimum als auch ein Maximum sein kann. Ersteres tritt ein bei der Brechung an einer ebenen Fläche. Bei gekrümmter Fläche kommt es ganz auf die Krümmung der Fläche an, ob der Lichtweg ein Minimum oder ein Maximum ist. Allen Fällen gemeinsam ist nur das Verschwinden der ersten Variation und diese Bedingung genügt vollkommen zur Bestimmung des Strahlenganges.

22. Satz von Malus. Stehen Strahlen einmal senkrecht zu einer Fläche, so stehen sie nach beliebig viel Spiegelungen oder Brechungen an kontinuierlich gekrümmten Flächen wiederum senkrecht auf einer Fläche. Man bezeichnet ein solches auf einer Fläche senkrechtes Strahlensystem als ein „orthogonales". Der Satz von Malus läßt sich also auch so aussprechen: Ein orthogonales Strahlensystem bleibt auch nach beliebig vielen Reflexionen und Brechungen an kontinuierlich gekrümmten Flächen ein orthogonales System von Strahlen. Der Beweis läßt sich leicht mit Hilfe des erweiterten Fermatschen Prinzips erbringen. In bezug auf die Lichtstrahlen drückt der Malussche Satz etwas Selbstverständliches aus, da gemäß der Wellenlehre des Lichtes die Lichtstrahlen nichts anderes sind als die Normalen zur Wellenfläche. Welches auch die Gestalt der Wellenfläche in irgend einem der brechenden Medien sei, stets stehen die Strahlen senkrecht zur Wellenfläche und umgekehrt ist diejenige Fläche Wellenfläche, auf welcher die Strahlen senkrecht stehen.

23. Aberrationsfreie Flächen. Cartesische Ovale. Eine brechende (oder spiegelnde) Fläche wollen wir als „aberrationsfrei" bezeichnen, wenn sie alle von einem Lichtpunkte ausgegangene Strahlen nach der Brechung (oder Spiegelung) in wieder einem Punkte vereinigt. Früher nannte man solche zuerst von R. Descartes studierte Flächen „aplanatische" Flächen. Da dieser Ausdruck aber nach Abbe Flächen beigelegt wurde, die außer der punktweisen Vereinigung noch einer

zweiten Bedingung (der sogenannten „Sinusbedingung“ siehe „Abbildungslehre“) genügen sollen, so habe ich die Cartesischen Flächen als „aberrationsfreie“ bezeichnet.

Descartes löste die Aufgabe, die Gestalt aberrationsfreier Flächen zu finden auf geometrischem Wege. Mit Hilfe des Begriffs der optischen Länge läßt sich die Aufgabe leicht formulieren: Es muß für alle Punkte der aberrationsfreien Fläche die vom leuchtenden Punkte aus gerechnete und bis zum Vereinigungspunkte genommene Summe der optischen Längen konstant sein. Ist also FF (Fig. 19) die gesuchte Fläche, L der Lichtpunkt und L′ der Vereinigungspunkt der gebrochenen Strahlen, so muß gelten:

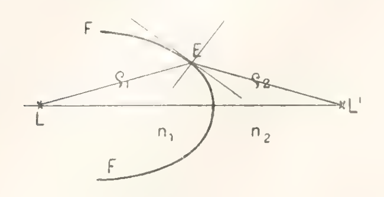


Fig. 19.

$$n_1\varrho_1 + n_2\varrho_2 = \text{const.}$$

Vereinigt die ebene Kurve FF alle von L in der Zeichenebene verlaufenden Strahlen in L′, so erhält man durch Rotation von FF um die Verbindungslinie LL′ als Achse die gesuchte aberrationsfreie Fläche. Die obiger Bedingung genügende aberrationsfreie Kurve ist eine ebene Kurve vierten Grades.

Im Falle, daß der Bildpunkt L′∞ (Fig. 20) im Unendlichen liegt, muß in unserer Bedingung für ϱ_2 der Abstand Es eines Punktes der Kurve von der Wellenlinie ss (Senkrechte zu den parallel austretenden Strahlen) gesetzt werden. Die gesuchte Kurve ist eine solche zweiten Grades.

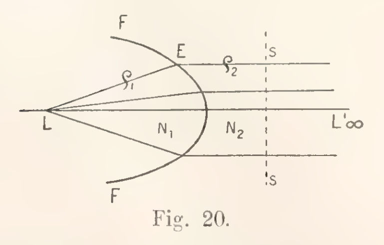


Fig. 20.

Im Falle FF (Fig. 19) eine spiegelnde Fläche ist, geht die Bedingung $n_1\varrho_1 + n_2\varrho_2 = \text{konst.}$ über in $\varrho_1 + \varrho_2 = \text{konst.}$, welche aussagt, daß die aberrationsfreie spiegelnde Kurve mit einer Ellipse identisch ist, deren Brennpunkte mit L und L′ zusammenfallen.

Wichtig für die praktische Optik ist außer dem Parabolspiegel (Scheinwerfer) nur die Brechung und Spiegelung an Kugelflächen. Im allgemeinen ist die Kugelfläche keine aberrationsfreie Fläche. Nur in ganz speziellen Fällen vereinigt die Kugelfläche alle von einem Punkte ausgegangene Strahlen. Erstens wenn der leuchtende Punkt mit dem Kugelmittelpunkt zusammenfällt und bei einer brechenden Kugelfläche F (Fig. 21) vom Radius r, wenn L vom Scheitel S um die Strecke $LS = n_2/n_1 . r$ abliegt, wobei dann $L'S = n_1/n_2 . r$ wird (s. unter 18). Alle von L ausgehenden Strahlen werden so gebrochen, daß sie von L′ zu kommen scheinen. Das Punktpaar L und L′ spielt eine Rolle bei den Mikroskopobjektiven mit Oelimmersion.

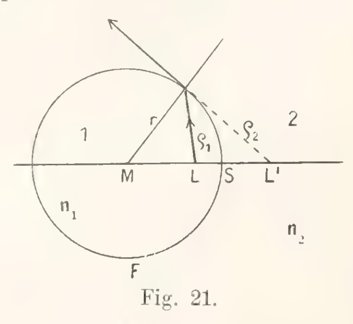


Fig. 21.

24. Die Diakaustik als Evolute der Wellenfläche. Für die aberrationsfreien Punkte einer aberrationsfreien Fläche sind die Wellenflächen im ersten und letzten Medium notwendig Kugeloberflächen. Für andere Punktepaare weicht die Wellenfläche im letzten Medium von der Kugeloberfläche mehr oder weniger ab. Da die Strahlen stets senkrecht zur Wellenfläche stehen, so schneiden sich in solchem Falle die gebrochenen Strahlen nicht mehr in einem Punkte. Bei stetig gekrümmten brechenden Flächen sind auch die Wellenflächen kontinuierlich gekrümmte Oberflächen; also schneiden sich wenigstens je zwei unendlich benachbarte Strahlen in einem Punkte und die Gesamtheit der gebrochenen Strahlen bildet die diakaustische Fläche. Um diese Fläche auf analytischem Wege zu finden, bedient man sich der Theorie der Normalen stetig gekrümmter Flächen. Aus dieser Theorie folgt, daß eine durch eine beliebige Normale (Strahl) gelegte Ebene die Wellenfläche in einer Kurve schneidet, deren Krümmung je nach der Lage der Ebene verschieden ist; dabei steht die Ebene, deren Schnittkurve die größte Krümmung besitzt, auf derjenigen Ebene senkrecht, welche die Wellenfläche in der Kurve der kleinsten Krümmung schneidet. Nur die in diesen beiden Ebenen verlaufenden, unmittelbar benachbarten Normalen schneiden den beiden Ebenen gemeinsamen Strahl (Hauptstrahl genannt) in je einem Punkte und zwar im Zentrum des größten oder kleinsten Krümmungskreises. Wir wollen diese

Punkte als „*Brennpunkte*“ auf dem Hauptstrahl bezeichnen.[1])

Was für die eine Flächennormale gilt, hat auch für jede andere Gültigkeit. Auf jeder Flächennormale gibt es daher zwei bevorzugte Punkte, die Brennpunkte derselben, in denen sie von denjenigen unendlich benachbarten Normalen getroffen wird, welche in den beiden Hauptnormalebenen verlaufen. Bestimmt man nach der angegebenen Regel diese bevorzugten Punkte für jede Flächennormale, so bildet die Gesamtheit aller dieser Brennpunkte die *Brennfläche*. Dieselbe besteht im allgemeinen aus zwei Flächenschalen, zu denen jede Flächennormale gemeinschaftliche Tangente ist.

Falls die Wellenfläche eine *Rotationsfläche* ist, verwandelt sich die eine Schale der Brennfläche ebenfalls in eine Rotationsfläche, während die andere in ein Stück der Rotationsachse zusammenschrumpft. Man sagt dann, es sei die eine Schale in *eine Gerade degeneriert*.

Verweilen wir bei diesem speziellen Falle und nehmen wir an, daß die Wellenfläche ein *Rotationsellipsoid* sei; es schneidet dann jede durch die Rotationsachse SM (Fig. 22) gelegte Ebene die Rotationsfläche

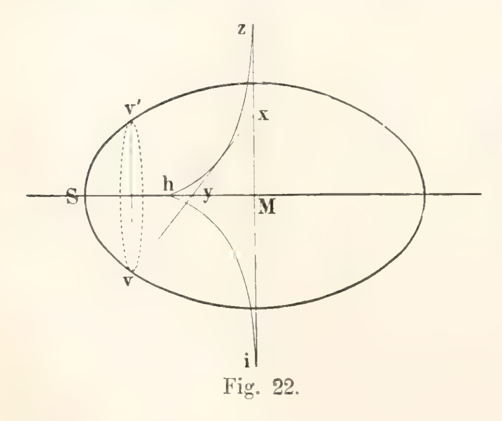


Fig. 22.

in einer *Ellipse*. Da alle auf dieser Ellipse senkrechten Strahlen xyv die *Brennkurve* zhi bilden, so erhalten wir also die *eine Brennfläche* einfach durch Rotation der Figur 24 um die Achse SM.

Außer der durch zhi bei dieser Rotation entstandenen Brennfläche gibt es aber noch eine zweite, welche der anderen Schar von Krümmungslinien entspricht, in denen das Rotationsellipsoid von den Ebenen geschnitten wird, welche senkrecht auf den Achsenebenen stehen. Diese Krümmungslinien sind hier Kreise vv', deren Zentren auf der Rotationsachse SM liegen; alle Flächennormalen längs einer solchen Kreislinie schneiden sich *in einem Punkte* y *der Achse selbst*. Denn jeder Strahl yv beschreibt bei der Rotation der Figur um SM als Achse den Mantel eines geraden Kreiskegels, dessen Spitze in der Achse bei y liegt und dessen Grundfläche der von v beschriebene Kreis ist. Die den verschiedenen Parallelkreisen entsprechenden Schnittpunkte y bilden also keine *Brennfläche*, sondern die *Brennlinie* hM.

Die Gesamtheit aller Normalstrahlen zum Ellipsoid kann man also in zweierlei Art durchlaufen, und zwar einmal als Senkrechte zu den Meridionalschnittkurven, hier den Ellipsen; als solche bilden sie die *erste* Brennfläche, welche aus der Rotation der *kaustischen Kurve* zhi dieser Ellipse entsteht. Das andere Mal als Flächennormalen zu sämtlichen Parallelkreisen (den Aequatorialschnittkurven); als solche bilden sie die hier in eine Gerade hM (ein Stück der Rotationsachse selbst) degenerierte *zweite* Brennfläche.

Wie in der Flächentheorie weiter gelehrt wird, stehen die Wellenflächen zu ihren Brennflächen in folgender Beziehung: Während alle Normalstrahlen zur Wellenfläche die Brennfläche einhüllen, erhält man aus der Brennfläche die Wellenfläche durch Abwickelung; dasselbe gilt von der Wellenlinie und ihrer kaustischen Kurve. Man bezeichnet daher die kaustische Kurve (hier ihz) mit dem Namen *Evolute* und die Wellenlinie (hier die Ellipse) als *Evolvente*.

Es sei abc (Fig. 23) ein unendlich kleines Stück einer Wellenkurve σ und ma oder rc seien die Krümmungsradien in den Punkten

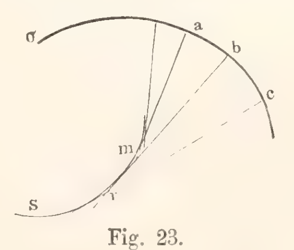


Fig. 23.

a oder c; schneidet die Verbindungslinie rm die Kurve σ im Punkte b, so gilt $br = cr$ und $am = bm$, also auch: $mr = cr - am$. Ist s die Verbindungslinie der Krümmungszentren m, r usw., d. h. die von den Normalstrahlen am, cr usw. eingehüllte Kurve, so gilt also der Satz: Die Differenz zwischen zwei Krümmungsradien ist gleich dem Bogen

[1]) Die in den anderen Ebenen verlaufenden unendlich nahen Strahlen treffen den Hauptstrahl also *nicht*; die sukzessiven Schnittpunkte dieser Strahlen liegen auf zwei unendlich kleinen Geraden, welche einzeln durch je einen der beiden Brennpunkte des Hauptstrahles gehen, auf diesem senkrecht stehen und in den beiden Hauptebenen liegen (s. unter 26).

der Eingehüllten, genommen zwischen den entsprechenden Krümmungszentren.

Aus diesem Grunde nennt man die Kurve s die Evolute von σ: denn denkt man sich einen Faden auf s aufgelegt, dessen eines Ende fest mit s verbunden ist und dessen zweites Ende von m nach a gespannt wird, so beschreibt dieses freie Ende die Wellenkurve σ, wenn man den Faden so auf s auf- oder abwickelt, daß stets das nicht auf s aufliegende Stück straff gespannt ist. Die Wellenkurve heißt daher die Evolvente von s.

Um also bei nichtsphärischen Rotationsflächen die Schnittpunkte unendlich benachbarter Strahlen zu finden, konstruiert man einfach die Evoluten zu den Wellenflächen. Nur wenn die letzteren Kugelflächen sind, reduzieren sich die beiden Brennflächen auf den Mittelpunkt der Kugelfläche.

Gemäß der in der geometrischen Optik gültigen Strahlentheorie ist immer da eine Lichtkonzentration, wo sich Strahlen schneiden. Bleiben wir auf diesem Boden stehen, so genügt es für jedes brechende System die Diakaustik zu bestimmen d. h. die zur Wellenfläche im letzten Medium zugehörige Evolute zu konstruieren, um die Lichtkonzentration des brechenden Systems kennen zu lernen. Wir wollen nur das Resultat für den speziellen Fall einer ebenen brechenden Fläche lösen.

Ist die Gerade iCz (Fig. 24) die Trennungslinie zwischen dem oberen oder unteren Medium mit dem absoluten Brechungsquotienten n_1 oder n_2 und P ein im oberen, optischen dichteren Medium ($n_1 < n_2$) leuchtender Punkt, so ist die Halbellipse rsv die

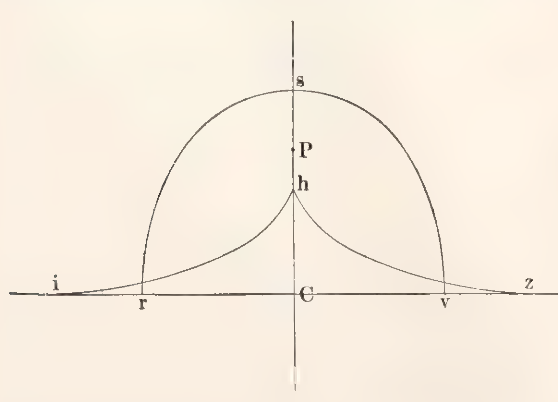


Fig. 24.

Wellenlinie und ihre Evolute ihz die kaustische Kurve zu allen ins untere Medium (n_2) gebrochenen Strahlen.

Dabei gilt für die Strecken hC und zC für den Fall, daß der leuchtende Punkt P im Wasser sich befindet ($n_1/n_2 = {}^4/_3$):

$$hC = PC \cdot n_2/n_1 = \frac{3}{4} PC$$

$$\text{und } zC = PC\sqrt{(n_1/n_2)^2 - 1} = 1{,}14\, PC.$$

Durch Rotation der kaustischen Kurve ihz und der Wellenkurve vsr um PC als Achse erhalten wir die kaustische Fläche und die Wellenfläche zu sämtlichen von P räumlich ausgegangenen und gebrochenen Strahlen.

25. Beobachtung eines im Wasser leuchtenden Objektes. Astigmatismus schiefer enger Büschel. Wir betrachten zunächst den einfacheren Fall der a) Abbildung eines leuchtenden Punktes. Es sei P (Fig. 25)

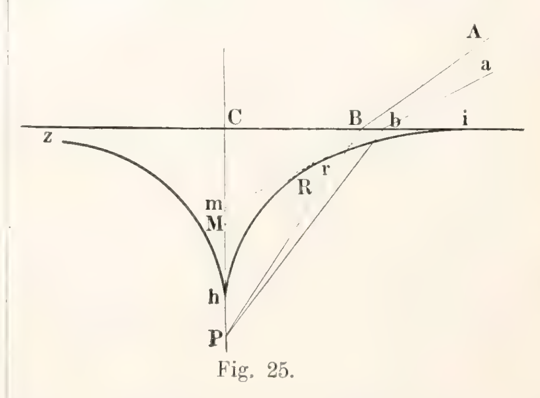


Fig. 25.

ein im Wasser mit ebener Oberfläche leuchtender Punkt und zhi die kaustische Kurve zu allen in der Zeichenebene verlaufenden gebrochenen Strahlen. Wo erscheint dem Auge A der leuchtende Punkt P, wenn das Auge in beliebiger Richtung AB zur Wasseroberfläche blickt? Wegen der Kleinheit der Augenpupille gelangen in das Auge stets nur unendlich benachbarte Strahlen. Wo sich diese schneiden, da erscheint also dem Auge das Bild von P. Jeder zu einem einfallenden Strahl PB (Pb) gehörige gebrochene Strahl BA (ba) berührt die kaustische Kurve ih in einem Punkte R (r) und dort schneidet er sich mit seinem unendlich benachbarten Strahl. Befindet sich das Auge z. B. bei A, so erscheint diesem der Objektspunkt P demnach bei R, d. h. da, wo die vom Auge an die Kurve zhi gelegte Tangente ARM jene berührt; steht das Auge senkrecht über P, dann erscheint das Bild in h d. h. um $^1/_4$ der Strecke PC gehoben. Blickt man schief gegen die Wasseroberfläche, so erscheint der Objektspunkt gehoben und zugleich seitlich verschoben. Je tiefer sich das Auge A zur Wasserfläche senkt, so daß die wirksamen

Strahlen sich der streifenden Inzidenz nähern, um so näher rückt der Bildpunkt R längs der kaustischen Kurve nach i; daraus folgt also, daß alle Strahlen, welche von P ausgehen und die kaustische Kurve nicht treffen, wegen Totalreflexion ins Wasser zurückkehren

Es entsteht aber vom Objektpunkt nur dann wieder ein Bildpunkt, sobald vom Punkte P stets nur einige wenige unendlich benachbarte Strahlen ins Auge gelangen; nur in solchem Falle überblickt man gleichsam ein unendlich kleines Flächenelement der Kaustik. In Wirklichkeit aber kommt eine ganze Anzahl Strahlen ins Auge, welche die Kaustik in zwei zueinander senkrechten, unendlich kleinen Geraden berühren. Man kann sich davon leicht durch folgende Ueberlegung überzeugen. Wir erhalten alle von P kommenden Strahlen, indem wir die in der Papierebene verlaufenden um CP als Achse rotieren lassen. Die auf dem Kegelmantel PB liegenden Strahlen schneiden sich nach der Brechung rückwärts verlängert alle im Punkte M; es kommen zwar diese Strahlen nicht alle ins Auge, sondern wegen der Kleinheit der Pupille nur ein kleines Stück der Peripherie B, immerhin aber so viele, daß man mehrere Punkte R nebeneinander erblickt, d. h. statt eines Bildpunktes eine kleine, auf der Papierebene senkrecht stehende gerade Lichtlinie.

Ferner gelangen aber auch von den Strahlen in der Papierebene mehrere ins Auge; es seien dies die zwischen PB und Pb verlaufenden. Da der Strahl Pb nach dem Austritt von m zu kommen scheint, so gehen alle zwischen BA und ba austretenden Strahlen rückwärts verlängert durch die Linie Mm, und das Auge sieht bei Mm eine kleine, zur ersten Lichtlinie bei R senkrechte (da in der Papierebene gelegen) zweite Lichtlinie. Beide Lichtlinien schrumpfen zu einem Punkte h zusammen, wenn man senkrecht auf P hinabsieht längs CP.

Die Vereinigung enger Büschel in zwei zueinander senkrechten kleinen Brennlinien faßt man unter dem Namen „Astigmatismus“ zusammen (s. unter 26).

b) Beobachtung eines in Wasser befindlichen Objektes. Es werde jetzt die Pupille als unendlich klein angenommen. Man betrachte einen leuchtenden Gegenstand xyz (Fig. 26) unter Wasser. Um für eine beliebige Lage des Auges das Bild von xyz zu finden, denkt man sich das Objekt aus lauter leuchtenden Punkten zusammengesetzt, konstruiert für jeden derselben die Diakaustik und zieht Tangenten vom Auge an diese Kurven. Die Verbindungslinie aller dieser Berührungspunkte ist das gesuchte Bild von xyz. In Figur 26 ist $x_1y_1z_1$ das Bild für die Stellung A_1 des Auges, $x_2y_2z_2$ das Bild für die Stellung A_2 des Auges.

26. Sturmscher Satz. Astigmatismus enger Strahlenbüschel. Der schon im vorigen Abschnitt skizzierte Astigmatismus, welcher bei ebener brechender Fläche im Falle schiefer enger Strahlenbündel uns begegnete, tritt viel allgemeiner auf und zwar immer dann, wenn die brechende Fläche mhqp (Fig. 27) in bezug auf die Achse des auffallenden Strahlenbündels keine Rotationsfläche ist. Aus der Theorie der Normalen stetig gekrümmter Flächen folgt auch

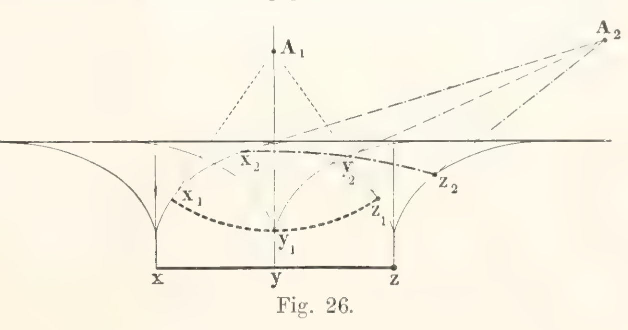


Fig. 26.

hier die Natur eines solchen Büschels nach der Brechung ohne alle Rechnung.

Da die brechende Fläche mhqp keine

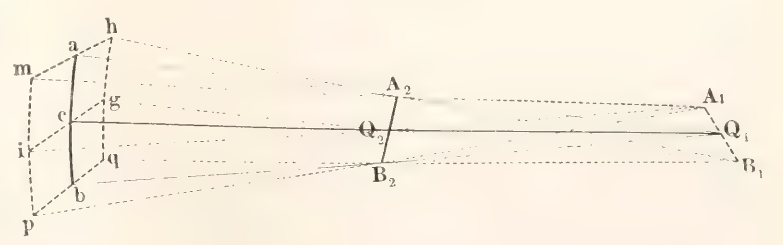


Fig. 27.

Rotationsfläche in bezug auf den bei c auffallenden Zentral- oder Achsenstrahl des einfallenden Strahlenbüschels ist, so schneiden die verschiedenen durch den gebrochenen Achsenstrahl CQ_2Q_1 gelegten Ebenen aus der Fläche mhqp Kurven verschiedener

Krümmung aus. Wir wollen diejenigen Ebenen als die „Hauptschnitte“ (Hauptnormalschnitte) bezeichnen, welche die Kurven größter und kleinster Krümmung aus der Fläche ausschneiden. Es seien acb bezw. icg die unendlich kleinen Stücke der betreffenden Schnittkurven größter und kleinster Krümmung und Q_1 und Q_2 die zugehörigen Krümmungsmittelpunkte. Die durch acb und icg gelegten Hauptschnitte stehen senkrecht aufeinander. Die von acb ausgehenden Strahlen schneiden den Axentrahl in Q_1; die von icg kommenden Strahlen schneiden den Axenstrahl in Q_2. Wo liegen die Schnittpunkte je zweier unendlich benachbarter Flächennormalen der übrigen unmittelbar bei c verlaufenden Normalen zur Fläche mhqp? In anderen Worten: Welches ist die Gestalt der Brennfläche, die vom räumlichen unendlich engen Strahlenbüschel gebildet wird?

Dazu ziehen wir vorerst in den Punkten a und b der Wellenfläche die Schnittkurven kleinster Krümmung, deren unendlich kleine Stücke mh und pq als zu ig parallel[1]) betrachtet werden dürfen. Der Brennpunkt aller von ham kommenden Strahlen liegt jedenfalls auf dem mittleren Strahle aQ_1, während derjenige von pbq auf Strahl bQ_1 liegen muß. Verlaufen die Strahlen senkrecht zu mah in der Ebene mQ_1h, so verlaufen die Strahlen senkrecht zu pbq in der Ebene pQ_1q; beide Ebenen stehen auf der Ebene aQ_1b senkrecht. Wo also auch der Schnittpunkt A_2 bezw. B_2 liegen mag, die durch sie gehenden ebenen Strahlenbüschel mA_2h und pB_2q schneiden die Ebene iQ_2g in ein und derselben Geraden $A_1Q_1B_1$, welche erstens senkrecht zum Hauptstrahle Q_2Q_1 des ganzen Büschels mhqp und zweitens senkrecht zur Ebene aQ_1b liegen. Wir wollen die gemeinsame Gerade $A_1Q_1B_1$ der Büschel mah, icg und pbq der Kurven kleinster Krümmung (Büschel zweiter Art) als die erste Brennlinie bezeichnen.

Ferner ziehen wir in den Punkten i und g die Schnittkurven größter Krümmung, deren unendlich kleine Stücke mp und hq als parallle[1]) zu ab angesehen werden dürfen. Alle Strahlen von mp oder hq schneiden den mittleren Strahl iQ_2 oder gQ_2, sie verlaufen also in einer Ebene, welche mp oder hq und den Strahl iQ_2 oder gQ_2 enthält. Da diese Ebenen senkrecht zur Ebene iQ_2g der kleinsten Krümmung und somit zum Hauptstrahl cQ_2Q_1 senkrecht stehen, so schneiden sie sich in einer Geraden $A_2Q_2B_2$, welche senkrecht zum Hauptstrahle cQ_2Q_1 und zur ersten Brennlinie $A_1Q_1B_1$ steht. Die Gerade $A_2Q_2B_2$ heißt die zweite Brennlinie.

Wir haben also das Gesamtbüschel mhqp in zwei Scharen ebener Büschel geteilt; nennen wir die der Zeichnungsebene parallelen Büschel mip, acb, hgp die Büschel erster Art, die zur Papierebene senkrechten Büschel mah, icg, pbq dagegen diejenigen der zweiten Art, so lautet unser Resultat:

Beide Arten ebener Büschel schneiden sich in je einer Brennlinie senkrecht zum Hauptstrahl. Während aber die Brennlinie der Büschel erster Art in der Ebene des zweiten Hauptschnittes liegt, ist umgekehrt die Brennlinie zweiter Art im ersten Hauptschnitte gelegen. Die beiden Brennlinien liegen also außerdem in zueinander senkrechten Ebenen (Sturmscher Satz). Den Abstand $Q_1 Q_2$ zwischen den beiden Brennlinien nennt man die „astigmatische Differenz“.

Nur in ganz speziellen Fällen wird durch ein solches astigmatisches Strahlenbüschel ein Objekt ähnlich und punktweise abgebildet. Nur wenn das Objekt eine zum Hauptstrahl senkrechte, unendlich kleine gerade Lichtlinie ist und wenn deren Richtung parallel zu den Schnittkurven ig der kleinsten oder ab der größten Krümmung parallel läuft. Die parallel zu ab verlaufende Objektlinie bildet sich als eine Gerade A_2B_2 bei Q_2 ab, die parallel zu ig verlaufende Objektlinie als eine Gerade A_1B_1 bei Q_1.

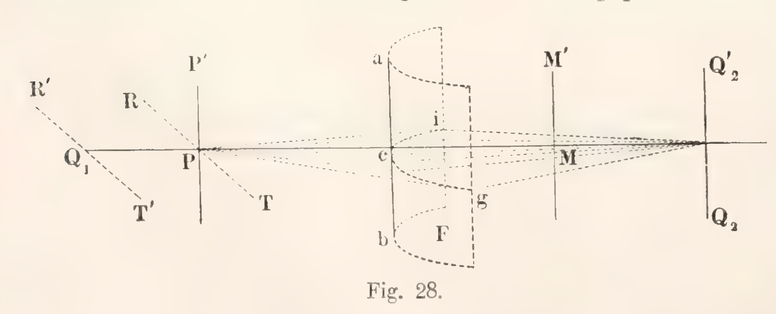


Fig. 28.

Als Typus astigmatisch brechender Flächen kann die Zylinderfläche F (Fig. 28) hingestellt werden, da an ihr auch das normal einfallende Strahlenbüschel astigmatisch gebrochen wird. In der Tat schneidet ja das vom Objektpunkt P normal auffallende Büschel PM die Zylinderfläche in der Kreiskurve icg und in der Geraden acb, also in Kurven ganz verschiedener Krümmung. Ist Q_2 der Vereinigungspunkt des ebenen Büschels iPg, so wird die in der Zeichnungs-

[1]) Unter Vernachlässigung unendlich kleiner Größen höherer Ordnung.

ebene gelegene Objektlinie P′P als Lichtlinie $Q_2{}'Q_2$ abgebildet, die ebenfalls in der Zeichnungsebene gelegen ist.

Das ebene Büschel aPb, welches die Zylinderfläche in der geraden Linie ab schneidet (Krümmungskreis mit dem Radius Unendlich) habe seinen virtuellen Vereinigungspunkt bei Q_1. Demnach wird die senkrecht zur Zeichnungsebene gelegene Objektlinie RT als virtuelle Lichtlinie R′T′ abgebildet, die ebenfalls senkrecht zur Zeichnungsebene gelegen ist.

Die Brechung an Zylinderflächen spielt eine große Rolle bei den Zylinderlinsen.

27. Experimenteller Nachweis von Astigmatismus. Um den Astigmatismus z. B. des menschlichen Auges nachzuweisen, betrachtet man ein System sich rechtwinkelig kreuzender dunkler Linien auf hellem Grunde. Ist das Auge frei von Astigmatismus, so wird es beide Liniensystem bei jeder Lage derselben zugleich deutlich erblicken. Im anderen Falle erscheinen im allgemeinen beide Systeme undeutlich, auch wenn man genau fixiert hat; ändert man aber die Lage des Kreuzgitters, indem man es um die Sehrichtung dreht, so wächst die Schärfe des einen Streifensystems, während die Deutlichkeit des anderen abnimmt. Dreht man um 90° weiter, so tritt die umgekehrte Erscheinung ein. Zur Korrektion des Astigmatismus bedient man sich geeigneter Zylinderlinien.

Will man sehen, ob eine ebene spiegelnde oder brechende Fläche eine mathematisch ebene Fläche ist, so bedient man sich nach Oertling ebenfalls des Astigmatismus als Kriterium. Man betrachtet mittels eines Fernrohres das Spiegelbild, welches die zu untersuchende spiegelnde Fläche von dem Objekt P (Fig. 29) entwirft, und zwar bei möglichst streifender Inzidenz der Lichtstrahlen. Ist die Fläche absolut plan, so zeigt das Fernrohr beide Linien v und h gestrichelt, wie es das Original darstellt. Ist die Fläche gekrümmt, so gibt es eine Lage des Objektes, wo nur die eine Gerade (z. B. h) gestrichelt erscheint, während die andere Gerade (v) als ununterbrochene Linie gesehen wird. Aendert man jetzt die Einstellung des Fernrohres, bis man die andere Gerade v gestrichelt sieht, so erscheint die Linie h als ununterbrochene Gerade.

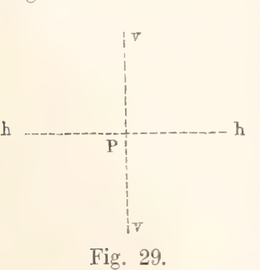


Fig. 29.

Wie empfindlich diese Methode ist, geht aus einer Berechnung Czapskis hervor. Läßt man an einem Quecksilberspiegel das in Fig. 29 abgebildete Kreuzgitter spiegeln, so kann man mit geeigneten Mitteln den Astigmatismus wahrnehmen, welcher dadurch hervorgerufen wird, daß das Quecksilberniveau infolge der Krümmung der Erde Kugelgestalt annimmt. Betrachtet man nämlich das Spiegelbild des im Unendlichen befindlichen Kreuzgitters mittels eines Fernrohres von 7,5 m Brennweite (Oeffnung etwa 0,5 m), so ist die astigmatische Differenz gleich 0,1 mm, d. h. es sind die Orte, wo das eine oder andere System von Gitterstäben deutlich ist, um 0,1 mm voneinander getrennt. Würde man aber das Riesenfernrohr des Lick-Observatoriums in Kalifornien zur Beobachtung anwenden, so würde jene Differenz bis auf 0,7 mm steigen.

Eine schöne experimentelle Prüfung der Gesetze über die Strahlenbrechung schiefer Büschel hat G. Quincke an einer einfachen Linse durchgeführt.

Literatur. *Geschichtliches (vgl. den Artikel „Abbildungslehre"). Zusammenhängende Darstellungen (vgl. den Artikel „Abbildungslehre"). Gesammelte Abhandlungen und Originalwerke (vgl. den Artikel „Abbildungslehre"). Außerdem* ***R. Descartes,*** *Geometria lib. II, 54, 1683 (Aberrationsfreie Flächen). —* ***A. Gleichen,*** *„Die Haupterscheinungen der Brechung und Reflexion des Lichtes, dargestellt nach neuen (von Schellbach herrührenden) Methoden", Leipzig 1889 (Konstruktion von Weyerstrass). —* ***H. v. Helmholtz,*** *„Handbuch d. physiolog. Optik", Leipzig 1867 (Astigmatismus bei prismatischer Abbildung). —* ***Joh. Kepler,*** *„Dioptrice", Wien 1611, Prop. XIII, S. 4 und Prop. XVIII, S. 7 (Totalreflexion und Strahlengang im rechtwinkligen Prisma). —* ***E. Ketteler,*** *„Theoretische Physik". Braunschweig 1885 (Dispensionsformeln). —* ***H. Konen*** *in Kaysers „Handbuch der Spektroskopie", Leipzig 1900 (Strahlenverlauf in Prismen usw.). —* ***E. Pringsheim,*** *„Vorlesungen über die Physik der Sonne" 1910 (Sonnentheorie von Schmidt). —* ***E. Reusch,*** *„Theorie der Zylinderlinsen", Leipzig 1868. —* ***Cl. Schaefer,*** *„Einführung in die Maxwellsche Theorie d. Elektr. u. d. Magnetism." 1908. —* ***Schellbach und Engel,*** *„Darstellende Geometrie". Halle 1878 (Astigmatismus. Verlauf der Strahlen im Meridionalschnitt).*

Abhandlungen (vgl. den Artikel „Abbildungslehre"). Außerdem: ***G. B. Airy,*** *Cambr. Philos. Trans.* ***3****, 1 bis 65, 1827 (Astigmatismus). —* ***L. Boltzmann,*** *Pogg. Ann.* ***155****, 407, 1873 und Wien. Ber.* ***69****, 795, 1874. —* ***Dupin,*** *Ann. de chim. et de phys. (2)* ***5****, 1817 (Erweiterung des Malusschen Satzes auf viele spiegelnde Flächen). —* ***Fermat,*** *Litterae ad P. Mersennum contra Dioptricam Cartesianum, Paris 1667 (Satz von Fermat). —* ***S. Finsterwalder,*** *„Ueber Brennflächen und die räumliche Verteilung der Helligkeit bei Reflexion eines Lichtbündels usw.", Inaug.-Diss. Tübingen 1886. —* ***G. Kirchhoff,*** *„Zur Theorie der Lichtstrahlen", Berl. Ber. 1882, 641 bis 670. Pogg. Ann. d. Phys. 1883,* ***18****, 663 bis 695. —*

E. Kummer, Crelles Journ. 1860, 57 und 208 (Gebogene Lichtstrahlen). — F. Lippich, Denkschr. d. Wien. Akad. 38, 163, 1877 (Astigmatismus). — Malus, Journ. de l'Ecole Polyt. 14, 1 und 84, 1808 (Satz von Malus). — Oertling, Verh. d. Ver. z. Bef. d. Gewerbefl. 1843 (Methode zur Prüfung d. Astigmatismus). — G. Quincke, Berl. Akad. Ber. 1862, S. 498 und Pogg. Ann. 117, S. 563 (Demonstration des astigmatischen Strahlengangs an Linsen). — E. Reusch, Univers. Progr. Tübingen 1857 und Pogg. Ann. 130, 497, 1867 (Konstruktion der Strahlen im Prisma). — R. Straubel, Drudes Ann. d. Phys. 8, 63, 1902 (Abbildung durch Prismen). — W. Wiener, Wied. Ann. 49, 105 bis 150, 1893 (Gebogene Lichtstrahlen).

O. Lummer.

Lichtdispersion.

1. Einleitung: a) Begriff der Dispersion. Dispersionskurven. b) Achromatische Prismen und Linsen. Geradsichtprismen. c) Ausdehnung ins infrarote und ultraviolette Spektrum. Anomale Dispersion. 2. Methoden zur Messung der Dispersion: a) Prismenmethode. Spektrometer. Infrarot und Ultraviolett. b) Methode der Totalreflexion. Totalrefraktometer. c) Interferenzmethode. d) Messung anomaler Dispersion. Prismenmethode. Metallreflexionsmethode. 3. Theorieen der Dispersion: a) Elastische Theorie. b) Elektromagnetische Theorie.

1. Einleitung. 1a) Begriff der Dispersion. Dispersionskurven. Durch seinen bekannten Prismenversuch entdeckte Newton die Zusammensetzung des weißen Lichtes aus verschiedenfarbigem. Fängt man nämlich einen weißen Lichtstrahl nach seinem Durchgange und dabei erfolgter Ablenkung durch ein Glasprisma auf einem Papierschirm auf, so entsteht dort nicht ein weißer Fleck, sondern ein farbiges Band, das „Spektrum", in welchem die verschiedenen Farben in der Reihenfolge ihrer Brechbarkeit (rot, orange, gelb, grün, blau, indigo, violett) nebeneinander gelagert sind. Dieselbe Erscheinung zeigt ein Prisma aus einem beliebigen anderen durchsichtigen Körper (Bergkristall, Wasser usw.). Somit ist der Brechungsindex n (vgl. den Artikel „Lichtbrechung") eines durchsichtigen Mediums für verschiedene Farben, d. h. für verschiedene Lichtwellenlängen verschieden, er ist eine „Funktion der Wellenlänge λ". Dies Verhalten läßt sich graphisch folgendermaßen darstellen. Man ermittelt experimentell (siehe unten) für verschiedene Farben (Wellenlängen) die zugehörigen „absoluten" Brechungsindices (gegen Aether als angrenzendes Medium), und trägt in einem rechtwinkeligen Koordinatensystem erstere als Abscissen, letztere als Ordinaten auf. Eine glatte Kurve durch die so gewonnenen Punkte heißt die „Dispersionskurve" der betreffenden Substanz (vgl. Fig. 1). Sie ermöglicht uns, zu jeder Wellenlänge den zugehörigen Brechungsindex abzulesen. Der Theorie fällt dann die Aufgabe zu, die Gleichung dieser Kurve $n = f(\lambda)$ zu bestimmen und aus den Grundanschauungen der Lichttheorie zu einer Deutung des Phänomens und einer Ableitung dieser Gleichung zu gelangen.

Es zeigt sich nun, daß die Dispersionskurven aller durchsichtigen Substanzen von rot nach violett ansteigen, und ihre konvexe Seite nach unten kehren, d. h. n wächst schneller als die Wellenlänge abnimmt. Man sieht aus Tabelle 1 und Figur 1,

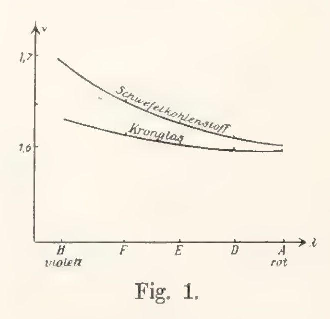


Fig. 1.

daß die verschiedenen durchsichtigen Substanzen sowohl bezüglich der absoluten Größe des Brechungsindex, wie bezüglich der Dispersion große Unterschiede aufweisen.

1b) Achromatische Prismen und Linsen. Geradsichtsprismen. Wären diese Unterschiede nicht vorhanden, wäre vielmehr, wie Newton glaubte, die Dispersion aller durchsichtigen Körper dieselbe, so wäre die Konstruktion achromatischer Fernrohrobjektive, d. h. Linsen ohne den Fehler chromatischer Abweichung (vgl. den Artikel „Linsensysteme") nicht möglich gewesen. Man sieht aber aus der Tabelle, daß Kronglas und Flintglas zwar einen nahezu gleichen „mittleren" Brechungsindex haben, daß aber die Dispersion des Flintglases, d. h. die Differenz der Brechungsindices für die äußersten Enden des Spektrums, A und H, ungefähr doppelt so groß ist, wie die des Kronglases. Wenn man also zwei Prismen, das eine K aus Kronglas, das andere F aus Flintglas mit etwa dem doppelten brechenden Winkel wie K, so kombiniert, daß ihre brechenden Kanten nach entgegengesetzten Seiten liegen (Fig. 2), so sieht man leicht ein, daß F die durch K erzeugte Brechung auf ungefähr die Hälfte vermindern, die durch K erzeugte Dispersion der Strahlen A und H bei geeigneter Wahl der brechenden Winkel genau aufheben kann, so daß beide Strahlen das Prisma zwar aus ihrer ursprünglichen Rich-

tung abgelenkt, aber einander parallel verlassen. Dasselbe gilt nahezu für alle anderen Farben und ein solches Prisma, das somit

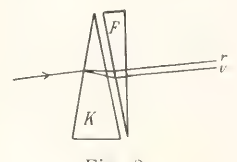


Fig. 2.

keine Dispersion und damit kein Spektrum, sondern nur eine Brechung erzeugt, nennt man a c h r o m a t i s c h. Aus diesem Prinzip läßt sich die Möglichkeit achromatischer Objektive durch Kombination von Konvex- und Konkavlinsen verschiedener Glassorten ohne weiteres verstehen.

Heutzutage stellt man nach dem Vorgange des bekannten glastechnischen Laboratoriums S c h o t t u n d G e n o s s e n in Jena Gläser von vorgeschriebener Dispersion her, über deren Eigenschaften der Katalog genaue Auskunft gibt. Man findet darin den Brechungsindex für die D-linie, die „mittlere" Dispersion Δn von C—F die „partiellen" Dispersionen A′—D, D—F, F—G′, die „relative" Dispersion $\frac{\Delta n}{n-1}$ und ihren reziproken Wert für die D-linie.

T a b e l l e 1. B r e c h u n g s i n d i c e s f ü r d i e F r a u n h o f e r'schen L i n i e n A, B, C u s w.

	A	B	C	D	E	F	G	H
Wasser 17,5°	1,3291	1,3306	1,3314	1,3332	1,3353	1,3374	1,3407	1,3430
Schwefelkohlenstoff 16°	1,6118	1,6181	1,6214	1,6308	1,6438	1,6555	1,6794	1,7032
Kronglas, schwer	1,6097	1,6117	1,6126	1,6152	1,6185	1,6213	1,6265	1,6308
Flintglas, leicht	1,5986	1,6020	1,6038	1,6085	1,6145	1,6200	1,6308	1,6404

Umgekehrt kann man Prismenkombinationen angeben, welche einen weißen Lichtstrahl nur dispergieren, aber nicht ablenken, sogenannte G e r a d s i c h t p r i s m e n. Zuerst hat A m i c i (1860) solche Konstruktionen erfunden. Sie sind sehr bequem, wenn man ein Spektrum durch direktes Anvisieren einer Lichtquelle in einem sogenannten „geradsichtigen Spektroskop", oder „Spectroscop à vision directe" erzeugen will.

T a b e l l e 2. J e n e n s e r G l ä s e r.

	Bezeichnung des Glases	n_D	n_F-n_C	$\frac{n-1}{\Delta n}$	$n_D-n_{A'}$	n_F-n_D	$n_{G'}-n_F$	Spez. Gewicht
0,225	Leichtes Phosphat Crown	1,5159	$737\cdot10^{-5}$	70,0	$485\cdot10^{-5}$	$515\cdot10^{-5}$	$407\cdot10^{-5}$	2,58
0,602	Baryt-Leichtflint	1,5676	1072	53,0	675	759	618	3,12
S 57	Schwerstes Silicat-Flint	1,9626	4882	19,7	2767	3547	3252	6,33

1c) A u s d e h n u n g i n s i n f r a r o t e u n d u l t r a v i o l e t t e S p e k t r u m. A n o m a l e D i s p e r s i o n. Die bisherigen Betrachtungen galten dem „sichtbaren" Spektrum und die technischen Bezeichnungen sind der praktischen Optik entnommen, welche sich nur für die Lichtsorten interessiert, die das menschliche Auge erregen. Dieses sichtbare Spektrum bildet aber nur einen kleinen Teil der von einer weißen Lichtquelle, wie z. B. der Sonne, ausgesandten Lichtstrahlung. An das Spektrum schließen sich nach beiden Seiten seine „unsichtbaren" Teile, nach Seite der längeren Wellen, d. h. vom Rot ab, das Gebiet des „Infrarot", nach Seite der kürzeren Wellen vom Violett ab das Gebiet des „Ultraviolett" (vgl. die Artikel „I n f r a r o t" und „U l t r a v i o l e t t"). Ein Medium ist in weiterem Sinne „durchsichtig", wenn es auch diese Strahlen durchläßt. Z. B. sind Steinsalz und weißer Flußspat weit ins Infrarot und Ultraviolett hinein, Bergkristall (Quarz) nur weit ins Ultraviolett, Glas nur für die unmittelbar angrenzenden Teile des Infrarot und Ultraviolett durchlässig. Andererseits kann ein Körper für das Auge „undurchsichtig" sein, aber durchsichtig für infrarote Strahlen (z. B. Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff) oder durchsichtig für ultraviolette Partieen (z. B. W o o d scher Ultraviolettfilter). In diesem erweiterten Sinne soll der Ausdruck „durchsichtig" oder „durchlässig" im folgenden gebraucht werden.

Es gelang nun bald nach Entdeckung der infraroten und ultravioletten Strahlen die Brechungsindices der für diese Strahlen durchsichtigen Körper zu bestimmen, und damit ihre Dispersionskurven ins infrarote und ultraviolette Spektrum auszudehnen bis zu denjenigen Wellenlängen, für welche

die Körper beginnen undurchsichtig zu werden. Hierbei stellte sich heraus, daß die Kurve im allgemeinen nach Ultraviolett zu immer stärker ansteigt, daß aber im Infrarot ihre Krümmung immer schwächer wird und durch einen Wendepunkt hindurch das Vorzeichen wechselt. Man betrachte die Tabelle 3 und die nach dieser gezeichneten Dispersionskurven des Steinsalz, Sylvin und Flußspat in Fig. 3 (μ bedeutet 0,001 mm).

Von größter Wichtigkeit für die theoretische Deutung des Dispersionsphänomens war die Auffindung der „anomal dispergierenden" Substanzen (Le Roux 1860 an Joddampf; Christiansen, Kundt 1871 an Farbstoffen). Gewisse organische Farbstoffe (Fuchsin, Cyanin usw.) verdanken ihr starkes Färbevermögen dem Umstande, daß sie bestimmte Partieen des sichtbaren Spektrums stark absorbieren, andere aber gut hindurchlassen. Z. B. absorbiert Fuchsin das Gelb-Grün und Blau sehr stark und erscheint darum schon in sehr dünner Schicht im durchgehenden weißen Licht, von dem es nur rot und violett passieren läßt, intensiv rot gefärbt. Es zeigt sich nun, daß diese Körper die stark absorbierten Strahlen zugleich „anomal dispergieren", d. h. der Brechungsindex nimmt für diese Strahlen mit abnehmender Wellenlänge ab, dagegen für die nicht absorbierten roten und violetten Strahlen zu; ferner ist für das ganze Rot der Brechungsindex größer als für das ganze Violett, und er steigt vor und hinter dem Streifen stark an (Kundtsche Regel). Die Dispersionskurve des festen Fuchsins hat daher (nach Pflüger) die in Tabelle 4 und Figur 4 gegebene Gestalt. Natürlich erschwert die starke Absorption die Messung für die absorbierten Strahlen außerordentlich und die Darstellung einer vollständigen Kurve wie in Figur 4, die Kundt nur erraten konnte, ist daher erst in neuerer Zeit gelungen.

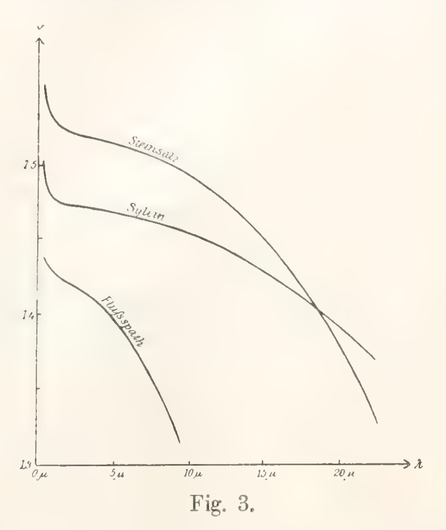


Fig. 3.

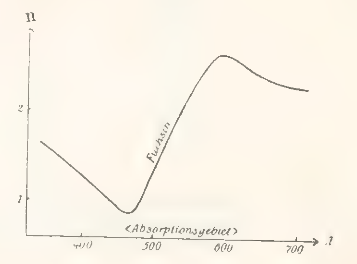


Fig. 4.

Man beachte die große Variation des Brechungsindex, zwischen 0,83 und 2,64, und den theoretisch wichtigen Umstand, daß im blau ν kleiner als 1 ist. Da der absolute Brechungsindex gleich dem Verhältnis der Lichtgeschwindigkeit $\frac{\text{Aether}}{\text{Medium}}$ ist, es bedeutet dies für blaue Strahlen größere Lichtgeschwindigkeit im Fuchsin wie im Aether (vgl. ~~den Artikel~~ „Relativitätsprinzip"). Endlich sei noch darauf aufmerksam gemacht, daß diese Körper diejenigen Strahlen, die sie stark absorbieren (und anomal dispergieren), sehr stark reflektieren. Sie verhalten sich also diesen Strahlen gegenüber wie die Metalle. Sie zeigen wie diese „Metallglanz", aber eben nur für die stark absorbierten Strahlen, während die Metalle, wenigstens die silberweißen, alle Strahlen des Spektrums nahezu gleich stark reflektieren. Fuchsin sieht darum im reflektierten Lichte glänzend gelbgrün aus, es zeigt „Oberflächenfarbe" (vgl. den Artikel „Farbe").

2. Methoden zur Messung der Dispersion. **2a)** Prismenmethode. Spektrometer. Infrarot und Ultraviolett. Man gibt der Substanz die Form eines dreiseitigen Prismas und mißt mittels eines

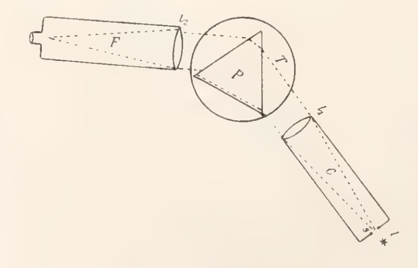


Fig. 5.

Spektrometers den Brechungsindex für verschiedene Farben. Figur 5 zeigt schematisch die Einrichtung des Instruments. T ist ein auf der Mittelachse des ganzen Apparates drehbar aufgesetztes Tischchen, F ein Fernrohr mit Objektiv l_2, das an einem ebenfalls um die Achse des Apparates drehbaren Arm befestigt ist. Der Betrag der Drehung kann an einem Teilkreis mit Mikroskopablesung gemessen

werden (bei feinen Instrumenten auf eine Winkelsekunde genau). C ist das mit dem Körper des Instruments gewöhnlich fest verbundene Kollimatorrohr, dessen Mittelachse wie die des Fernrohrs senkrecht zur Instrumentachse steht. Es enthält das Objektiv l_1 und in dessen Brennebene den zur Zeichnungsebene senkrechten, in seiner Breite verstellbaren Spalt s (bei feinen Instrumenten auf $^1/_{100}$ mm Breite einstellbar). Dieser wird von der vorgesetzten Lichtquelle L erleuchtet, die Strahlen verlassen dann das Objektiv l_1 als paralleles Bündel. Die Nullstellung des Instrumentes ist diejenige, bei welcher die Mittelachsen von C und F zusammenfallen. Man fixiert sie, indem man das im Fernrohr gesehene Bild des Spaltes mit dem Fadenkreuz des Fernrohrs zur Deckung bringt. Nunmehr wird das Prisma auf das Tischchen gesetzt, seine Begrenzungsflächen senkrecht zur Zeichnungsebene justiert, und der Betrag der Ablenkung des Spaltbildes für einfarbiges (homogenes) Licht durch Ablesung der Winkeldrehung des Fernrohrs (wobei das abgelenkte Bild wiederum mit dem Fadenkreuz zusammenfallen soll) gemessen. Der Brechungsindex für diese Lichtsorte ergibt sich, wenn man im „Minimum der Ablenkung" (vgl. den Artikel „Lichtbrechung") mißt, aus der Formel

$$n = \frac{\sin\frac{(\alpha+\beta)}{2}}{\sin\frac{\alpha}{2}},$$

wo α der brechende Winkel des Prismas, β der Ablenkungswinkel ist. Dies ist aber der relative Brechungsindex $\frac{\text{Luft}}{\text{Prismensubstanz}}$ aus welchem der absolute durch eine leichte Umrechnung (vgl. den Artikel „Lichtbrechung") gefunden wird. Die Beschreibung der Spezialkonstruktionen von Spektrometern für chemische und technische Zwecke, sog. Refraktometer, würde hier zu weit führen.

Zur Erzeugung einfarbigen Lichtes verwendet man die durch Metallsalze gefärbte Bunsenflamme, mit verdünnten Gasen gefüllte Geißlerröhren, den elektrischen Lichtbogen oder Funken zwischen Metallelektroden. Alle diese Lichtquellen geben diskontinuierliche Spektren (vgl. den Artikel „Spektralanalyse"), von denen eine genügend scharfe „Spektrallinie" eine für die Messungen ausreichende homogene Strahlung liefert. Eine solche Spektrallinie ist nichts weiter als ein in der betreffenden Lichtsorte leuchtendes Bild des Spaltes. Man braucht somit das Fadenkreuz nur nacheinander auf diese Bilder einzustellen, um die Brechungsindices für die zugehörigen Lichtsorten (Wellenlängen) zu erhalten.

Für Messungen im Infrarot und Ultraviolett müssen die Objektive des Spektrometers aus entsprechend durchlässigem Material (Steinsalz, weißer Flußspat, Quarz) bestehen. Achromatische Objektive erhält man aus einer Kombination von Quarz- und Flußspatlinsen, oder erheblich billiger von Quarz und Steinsalz, wobei die stark hygroskopische Steinsalzlinse von zwei Quarzlinsen luftdicht umschlossen wird. Im Infrarot bedient man sich am besten versilberter Hohlspiegel statt Linsen, wobei die durch chromatische Abweichung und durch Absorption der Linsen bedingten Schwierigkeiten ganz wegfallen. Das Schema der Anordnung eines solchen Hohlspiegelspektrometers zeigt Figur 6. Ultraviolette

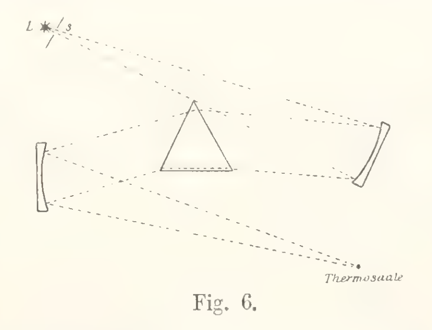


Fig. 6.

Linienspektra liefern in bequemster Weise elektrische Lichtbögen und Funken zwischen Metallelektroden. Die Einstellung des Fernrohrs erfolgt dann photographisch oder mittels einer Uranglasplatte in der Brennebene des Fernrohrobjektives, auf der die Spektrallinien in ihrem Fluoreszenzlicht sichtbar sind. Die Messung bietet keine besonderen Schwierigkeiten bis zur Wellenlänge 180 $\mu\mu$ herab. Für Licht von noch kleinerer Wellenlänge wird die Luft undurchlässig, und man muß besondere „Vakuumspektrometer" (Schumann) bauen, aus denen sich die Luft durch Auspumpen entfernen läßt. Auf diese Weise ist man in neuerer Zeit bis zur Wellenlänge von ungefähr 100 $\mu\mu$ vorgedrungen (Schumann, Lyman). Infrarote Linienspektra sind in genügender Intensität und in weiter Erstreckung ins Infrarot hinein nicht bekannt. Man erzeugt darum homogene infrarote Strahlung, indem man aus dem durch Gitter erzeugten (vgl. den Artikel „Spektralanalyse") kontinuierlichen Spektrum einer geeigneten Lichtquelle (Auerlicht, positiver Krater der Kohlenbogenlampe, Zirkonplättchen im Knallgasgebläse) eine genügend schmale Partie ausblendet, und dieses Licht auf den Spektrometerspaltfallen läßt. Zum Nachweis der Strahlung dient eine in der Brennebene des

Tabelle 3. Dispersion verschiedener durchsichtiger Substanzen.

λ in $\mu\mu$	Flußspat	Quarz ordtl. Strahl	Steinsalz beobachtet	Steinsalz berechnet
185	1,51024	1,67571	1,89332	(1,89331)
198	1,49643	1,65087	1,79580	(1,79585)
231	1,47533	1,61395	1,68840	(1,68842)
340	1,44774	1,56747	1,58601	(1,58601)
394	1,44231	1,55846	1,56889	(1,56892)
467	1,43787	1,55102	1,55554	(1,55555)
589	1,43385	1,54424	1,54413	(1,54411)
656	1,43251	1,54189	1,54047	(1,54046)
768	1,43093	1,53903	1,53644	(1,53642)
1142	—	—	1,5306	(1,5304)
1160	—	1,5329	—	—
1179	1,42787	—	—	—
2172	—	1,5180	—	—
2350	1,4220	—	1,5255	(1,5256)
4123	1,4085	—	1,5215	(1,5213)
4200	—	1,4569	—	—
5000	—	1,412	—	—
6450	—	1,274	—	—
6480	1,3782	Absorp-	1,5134	(1,5134)
8250	1,3444	tions-	—	—
8670	—	gebiet	1,5030	(1,5028)
9429	1,3161	—	—	—
13960	Absorp-	—	1,4627	(1,4625)
17930	tions-	—	1,4149	(1,4154)
22300	gebiet	—	1,3403	(1,3402)
51200	3,47	2,46	Absorptions-	
61100	2,66	2,12	gebiet	—

Fernrohrobjektivs oder des Hohlspiegels angebrachte, auf die Wärmewirkung der Strahlung reagierende Vorrichtung (Thermosäule, Bolometer, Radiometer, Radiomikrometer vgl. den Artikel „Strahlungsmessung"). Man ist damit bis zur Durchlässigkeitsgrenze des Steinsalzes, $\lambda = 22{,}5\ \mu$ ($\mu = 1000\ \mu\mu$) vorgedrungen. Noch längere Lichtwellen isoliert man mittels der „Reststrahlenmethode" (Rubens). Man läßt das Licht des Auerbrenners mehrmals von polierten Flächen geeigneter Substanzen reflektieren. Diejenigen Strahlensorten werden stark reflektiert, und bleiben daher in dem nach mehrmaliger Reflexion noch vorhandenen Strahlengemisch allein übrig, welche von den betreffenden Substanzen stark (metallisch) absorbiert werden. Dies sind im allgemeinen schmale Gebiete des Spektrums, die sich, wenn mehrere vorhanden sind, durch Gitter oder durch Interferenzmethoden voneinander trennen lassen. Auf diese Weise gewinnt man sowohl Aufschluß über das Vorhandensein von „Absorptionsstreifen" der betreffenden Substanzen im Infrarot, als auch ein Mittel zur Isolierung langwelliger ziemlich homogener Strahlen. Mit diesen kann man dann wieder die Brechungsindices für sie durchlässiger Substanzen bestimmen. Z. B. absorbiert Quarz sehr stark im Gebiet 7 bis 50 μ, wird dann wieder durchlässig, und sein Brechungsindex läßt sich für 51,2, 56,0, 61,1 μ mit Reststrahlen anderer Substanzen bestimmen. Auf diese und ähnliche Weise hat Rubens in neuester Zeit Strahlenkomplexe bis zu ⅓ mm Wellenlänge isoliert. Man betrachte nunmehr die Tabelle 3 und beachte das starke Ansteigen des Brechungsindex für Flußspat und Quarz auf der „roten" Seite des infraroten Absorptionsgebietes (Wellenlänge 51200 und 61100), welches wiederum auf anomale Dispersion in dem der Messung bisher nicht zugänglichen Absorptionsgebiet hindeutet.

2b) Methode der Totalreflexion. Totalrefraktometer. Lichtstrahlen, welche in einem optisch dichteren Medium (z. B. Glas) die Grenzfläche gegen ein optisch dünneres Medium (z. B. Luft) treffen, werden dann vollständig oder „total" reflektiert, wenn für den Einfallswinkel β die Beziehung gilt: $\sin\beta \gtreqless \frac{1}{n}$. Für kleinere β ist die Reflexion die gewöhnliche, „partielle". Läßt man Strahlen verschiedener Neigung auf die Grenzfläche auffallen, und beobachtet die Grenzfläche im reflektierten Licht, so ist der „Grenzwinkel der Totalreflexion", für welchen $\sin\beta = \frac{1}{n}$, leicht aus der deutlich erkennbaren Grenze zwischen dem totalreflektierenden, und darum hellleuchtenden und dem partiellreflektierenden und darum dunklen Gebiete der Grenzfläche, in welche diese scheinbar geteilt ist, zu bestimmen. Bei Verwendung weißen Lichtes ist die Grenze unscharf und farbig

gesäumt, entsprechend dem für verschiedene Farben verschiedenen n und darum verschiedenen Grenzwinkel, für homogenes Licht aber sehr scharf. Instrumente, welche auf diesem Prinzip zur Messung der n basieren, nennt man Totalreflektometer. Sie sind besonders geeignet für Messung der Flüssigkeiten. Bei der einfachsten Wollastonschen Anordnung (Fig. 7) wird die Flüssigkeit mit der Hypotenusenfläche eines

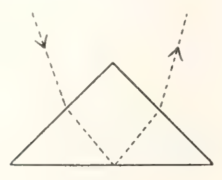


Fig. 7.

rechtwinkligen Prismas in Berührung gebracht, und der Grenzwinkel mit einem in der Vertikalebene drehbaren Fernrohr gemessen. Dabei muß das Glasprisma natürlich für alle Farben einen höheren Brechungsindex als die Flüssigkeit haben. Man wählt darum je nach Bedarf Prismen aus Kron- oder schwerstem Flintglas. Vollkommenere Konstruktionen sind das Kohlrauschsche und das Pulfrichsche Totalrefraktometer und andere. Die Methode ist auch zur Untersuchung fester Substanzen geeignet, die mit der polierten Oberfläche unter Benutzung eines geeigneten durchsichtigen Kittes an der Hypothenusenfläche befestigt werden.

2c) Interferenzmethode. Diese besonders zur Untersuchung der Gase geeignete Methode ist im Prinzip die folgende. Eine Glasröhre mit planparallelen Verschlußplatten wird in den Weg des einen der beiden miteinander interferierenden Strahlen eines Interferometers (vgl. den Artikel „Lichtinterferenz") gebracht, und einmal mit Luft, ein zweites Mal mit dem zu untersuchenden Gase gefüllt. Aus der Verschiebung der Interferenzfransen berechnet man in beiden Fällen den Gangunterschied gegen den anderen der beiden interferierenden Strahlen, und damit das Verhältnis der Lichtgeschwindigkeiten $\frac{\text{Luft}}{\text{Gas}}$, das nach der Lichttheorie gleich dem relativen Brechungsindex ist. Die Methode ist natürlich auch auf Flüssigkeiten und feste Körper anwendbar. Man benutzt sie für stark absorbierende Körper, die man in sehr dünner Schicht von bekannter Dicke in den Strahlengang bringt. Die Methode ist äußerst empfindlich und in verschiedenen Abänderungen, für welche auf Spezialwerke verwiesen sei, mit großem Erfolge auch zur Bestimmung der Dispersion von Gasen und Dämpfen in unmittelbarer Nähe ihrer Absorptionsstreifen verwendet worden (vgl. unten).

Einige andere, weniger gebräuchliche bezw. nur in speziellen Fällen anwendbare oder gebotene Methoden zur Bestimmung der Dispersion beliebiger Körper wollen wir hier übergehen.

2d) Messung anomaler Dispersion. Prismenmethode. Metallreflexionsmethode. Diese sind natürlich im Prinzip dieselben wie die oben beschriebenen. Da die Körper aber diejenigen Strahlen, welche sie anomal dispergieren, zugleich stark absorbieren, entstehen hier offenbar Messungsschwierigkeiten, die durch Spezialanordnungen überwunden werden müssen. Die Prismenmethode ist nicht ohne weiteres anwendbar, da bei solcher Dicke der Substanz überhaupt kein Licht mehr hindurchgehen würde.

Z. B. schwächt Fuchsin in 5 Zehntausendstel Millimeter dicker Schicht das Licht der E-linie auf den zweimillionsten Teil. Diese Absorptionsfähigkeit ist von derselben Größenordnung, wie die der Metalle, die gleichfalls schon in sehr dünner Schicht kein Licht irgendwelcher Wellenlänge hindurchlassen, während Fuchsin für rotes und violettes Licht wenigstens einigermaßen durchsichtig ist. Man sieht daraus wieder, daß Metalle gegenüber allen Lichtsorten dasselbe optische Verhalten zeigen, wie die anomal dispergierenden Körper gegenüber gewissen Lichtsorten, daher auch der Name „metallische Absorption". Es sei aber zur Verhütung von Mißverständnissen schon hier darauf hingewiesen, daß das optische Verhalten der Metalle nicht aus genau denselben theoretischen Annahmen erklärt werden kann, wie das der anomal dispergierenden Körper innerhalb des Absorptionsgebietes, sondern daß noch prinzipielle Verschiedenheiten bestehen. Wohl aber wird die Dispersion der Metalle nach denselben hier zu beschreibenden Methoden gemessen.

Entdeckt wurde die anomale Dispersion (Christiansen, Kundt) an wässerigen und alkoholischen Lösungen der Farbstoffe von solcher Verdünnung, daß wenigstens die schwächer absorbierten Strahlen an den „Rändern des Absorptionsstreifens" noch einigermaßen von der in ein gläsernes Hohlprisma eingegossenen Lösung oder von dem in ein solches Hohlprisma eingeschlossenen Joddampf (Le Roux) durchgelassen wurden. Bei solcher Verdünnung ist aber die anomale Dispersion nur wenig ausgeprägt; sie äußert sich in einer schwachen Deformation der im übrigen glatt verlaufenden Dispersionskurve des Lösungsmittels. Genauer und durch den ganzen Absorptionsstreifen hindurch konnte sie erst studiert werden, als Kundt gelehrt hatte, sehr dünne Metallprismen von nur wenige Sekunden großem brechenden Winkel (elektrolytische keilförmige Niederschläge auf Glas) herzustellen, ein Verfahren, das von Pflüger auf or-

ganische Farbstoffe (keilförmige Trocknungsniederschläge auf Glas) ausgedehnt wurde (später R. W. Woods durch Schmelzung erzeugte Cyaninprismen). Diese Prismen sind auch im Absorptionsgebiet genügend durchsichtig, um mit besten Präzisionsspektrometern die Messung der nur wenige Sekunden betragenden Ablenkungen und damit der Dispersion zu gestalten.

Tabelle 4. Brechungsindices anomal dispergierender Körper.

Farbstoffe. Nach Pflüger.

λ in $\mu\mu$	Fuchsin	Hofmanns Violett	Malachitgrün
703	2,30	2,57	2,49
671	2,34	2,53	2,50
589	2,64	2,20	1,33
535	1,95	1,27	1,16
486	1,05	0,86	1,45
461	0,83	—	—
434	1,04	1,32	1,38
413	1,15	—	—
410	—	—	1,28
403	—	1,47	—
399	1,24	—	—
345	1,60	—	—

Metalle. Nach Minor.

λ in $\mu\mu$	Silber	Kupfer	Stahl
670	—	—	—
630	—	0,56	2,65
589	0,177	0,62	2,49
500	0,169	1,10	2,00
450	0,164	1,13	1,89
395	0,155	1,17	1,66
336	0,256	—	—
322	0,833	—	1,37
257	1,531	1,40	1,38
226	1,406	—	1,30

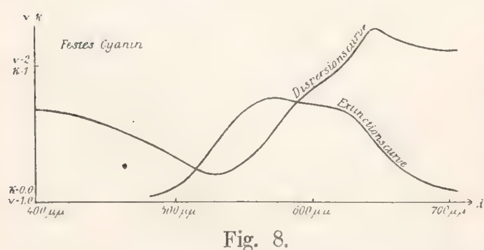


Fig. 8.

Die Totalreflexionsmethode ist unbrauchbar, weil die metallisch absorbierenden Körper das Licht innerhalb des Absorptionsstreifens nicht nach den Gesetzen der gewöhnlichen Reflexion, sondern nach denen der Metallreflexion reflektieren. Diese kennt überhaupt keine Totalreflexion in dem für durchsichtige Körper gültigen Sinne. Wir wollen im folgenden die Gesetze der gewöhnlichen und der metallischen Reflexion kurz kennen lernen (vgl. auch den Artikel „Lichtreflexion").

Für durchsichtige Körper gelten die Fresnelschen Reflexionsformeln. Nehmen wir den einfachsten Fall senkrechten Einfalls des Lichtes auf eine polierte ebene Grenzfläche eines durchsichtigen Körpers, so ist, wenn E die einfallende, R die reflektierte Intensität bedeutet,

$$R = E \frac{(n-1)^2}{(n+1)^2} \quad . \; . \; . \; 1)$$

Wenn man R und E mißt, bietet diese Formel die Möglichkeit einer, allerdings wenig benutzten und ungenauen Methode zur Bestimmung von n. Dagegen gilt für metallisch absorbierende Körper

$$R = E \cdot \frac{(n-1)^2 + \varkappa^2}{(n+1)^2 + \varkappa^2} \quad . \; . \; . \; 2)$$

$\varkappa$ ist der Extinktionsindex, definiert durch die Festsetzung, daß die Intensität des Lichtes innerhalb des Mediums beim Durcheilen einer Schicht von der Dicke einer Wellenlänge der benutzten Lichtsorte (gemessen im Aether, nicht im Medium) auf den Betrag $e^{-4\pi\varkappa}$ geschwächt wird. Für durchsichtige (d. h. in Wirklichkeit wenig absorbierende) und auch für nach der gewöhnlichen Anschauung stark absorbierende Körper, wie z. B. gefärbte Gläser, ist $\varkappa$ so klein, daß es in Formel 2 vernachlässigt werden kann, so daß Formel 1 resultiert. Nur für metallisch absorbierende Körper nimmt es Werte an, die zwischen etwa 1 und höchstens 6 liegen können. Eine leichte Betrachtung von Formel 2 zeigt, daß, wenn 2n klein gegen $n^2 + \varkappa^2$ ist, Zähler und Nenner des Bruchs nahezu gleich, der Bruch also nahezu 1, und R nahezu gleich E wird, d. h. es wird fast alles reflektiert.

Fällt natürliches Licht unter dem „Polarisationswinkel" φ auf die Grenzfläche eines durchsichtigen Körpers auf, so ist das reflektierte Licht linear polarisiert. Dabei besteht die Brewstersche Beziehung: $n = \operatorname{tg} \varphi$. Metalle und metallisch absorbierende Körper (für die Lichtsorten des Absorptionsstreifens) zeigen diese Eigenschaft nicht, wohl aber die folgende: schief einfallendes, linear polarisiertes Licht ist nach der Reflexion elliptisch polarisiert. Wir nennen den Winkel, welchen die Polarisationsebene des einfallenden Lichtes mit der Einfallsebene bildet, das Einfallsazimuth. Wenn dieses 45° ist, dann gibt es einen für jeden solchen Körper charakteristischen Einfallswinkel, den sogenannten Haupteinfallswinkel $\bar{\varphi}$, für welchen das Licht nach zweimaliger Reflexion (an zwei parallelen Flächen) wieder linear polarisiert ist, und zwar unter einem von 45° verschiedenen, für den Körper ebenfalls charakteristischen Azimuth $\bar{\psi}'$. Setzt man $\sqrt{\operatorname{tg} \bar{\psi}'} = \operatorname{tg} \bar{\psi}$, so ist $\bar{\psi}$ das sogenannten Hauptazimuth. Die Theorie der Metallreflexion lehrt nun, daß sehr angenähert die Beziehungen gelten:

$$n = \sin \bar{\varphi} \operatorname{tg} \bar{\varphi} \cos 2 \bar{\psi};$$

$$\varkappa = \sin \bar{\varphi} \operatorname{tg} \bar{\varphi} \sin 2 \bar{\psi} \quad . \; . \; . \; 3)$$

Diese Gleichungen geben eine sehr bequeme Methode, aus den experimentell zu bestimmenden $\bar{\varphi}$ und $\bar{\psi}$ die n und $\varkappa$ für beliebige Lichtsorten zu berechnen, und damit die Dispersionskurve sowie, da $\varkappa$ ebenfalls mit der Wellenlänge variiert, die „Extink-

tionskurve" des betreffenden Körpers zu bestimmen. Die Methode bietet geringere experimentelle Schwierigkeiten als die Prismenmethode, leidet aber unter dem Uebelstande, daß schon geringe Verunreinigungen der Oberfläche, sog. Oberflächenschichten, das Resultat erheblich fälschen können (zum Vergleich mit den durch prismatische Ablenkung erhaltenen Werten betrachte man Tabelle 6). Die Theorie zeigt nun weiter, daß n und $\varkappa$ für solche Körper überhaupt keine Konstanten sind, sondern mit dem Einfallswinkel variieren, daß also das Snelliussche Gesetz der Brechung, welches Unabhängigkeit vom Einfallswinkel fordert, nicht mehr gilt. Wir wollen darum im folgenden unter n und $\varkappa$ die Werte für senkrechten Auffall des Lichtes verstehen, und in der Tat sind in den Formeln 3 diese Werte gemeint. Auf die im einzelnen sehr variierenden experimentellen Methoden zur Bestimmung der „Konstanten der Metallreflexion" $\bar{\varphi}$ und $\bar{\psi}$ können wir hier nicht eingehen. Es genüge die Bemerkung, daß diese Methode für metallisch absorbierende Körper an die Stelle der Totalreflexionsmethode für durchsichtige Körper tritt, zumal, wie sich weiter erweisen läßt, Totalreflexion wegen der mit dem Einfallswinkel variierenden n und $\varkappa$ überhaupt nicht existiert.

Die Interferenzmethode ist, wie oben angeführt, ohne weiteres anwendbar, leidet aber an dem Uebelstande, daß das durch die absorbierende Schicht gegangene Lichtbündel gegenüber demjenigen, mit dem es interferieren soll, sehr geschwächt ist. Sie ist darum im wesentlichen nur bei der Bestimmung der Dispersion von Dämpfen angewandt worden, wo sie erhebliche Vorzüge hat. Die Dispersion der Dämpfe hat großes theoretisches Interesse. Sowohl die in der Bunsenflamme leuchtenden, wie die nicht leuchtenden, durch bloße Erhitzung gewonnenen Metalldämpfe zeigen nämlich mehr oder weniger scharf begrenzte, schmale Absorptionsstreifen, die, wie nach dem Kirchhoffschen Gesetze zu erwarten ist, mit den von den Dämpfen im leuchtenden Zustande ausgesandten Emissionslinien zusammenfallen. Nachdem wir erkannt haben, daß anomale Dispersion und starke (metallische) Absorption Hand in Hand gehen, werden wir erwarten dürfen, daß diese Dämpfe in der Nähe dieser Absorptionslinien anomale Dispersion zeigen, sofern die Absorption stark genug ist. Diese Erscheinung ist nun in der Tat nachgewiesen worden. Man gibt dem Dampfe zu diesem Zweck entweder prismatische Form, sei es durch Einschließen in ein Hohlprisma, oder bei Bunsenflammen durch eine geeignete Gestalt des Brenners, der die Flamme prismatisch macht, oder aber man sucht dem Dampf eine nach einer Richtung wachsende Dichtigkeit zu geben (R. W. Wood), was denselben Effekt hat, wie prismatische Gestaltung und somit die Anwendung der Prismenmethode gestattet. Endlich aber wendet man die Interferenzmethode in zahlreichen Variationen an. Auf diese Weise erhält man Dispersionskurven vom Typus der Figur 10. Die gestrichelte Linie soll andeuten, daß es bisher noch nicht gelungen ist, die Dispersionskurve für die am stärksten absorbierende Mitte λ_m des Absorptionsstreifens experimentell festzulegen. Es ist aber wohl unzweifelhaft, daß die Messungsergebnisse in diesem Sinne zu ergänzen sind. Numerische Angaben finden sich in Tabelle 5 für Natriumdampf. Man beachte die große Variation des Brechungsindex, der sich für die schwach absorbierten Partieen des Spektrums nur wenig von λ unterscheidet.

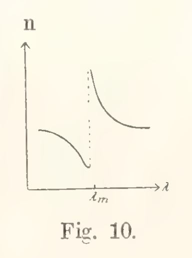


Fig. 10.

Tabelle 5. Dispersion des Natriumdampfes in der Umgebung der D-Linien. Nach R. W. Wood.

λ	599,1 $\mu\mu$	590,4 $\mu\mu$	590,1 $\mu\mu$	589,94 $\mu\mu$	589,76 $\mu\mu$	589,70 $\mu\mu$	589,64 $\mu\mu$	588,96 $\mu\mu$
n	1,0046	1,0092	1,0138	1,0184	1,0557	1,094	1,386	0,697
λ	588,84 $\mu\mu$	588,66 $\mu\mu$	588,5 $\mu\mu$	588,2 $\mu\mu$	587,5 $\mu\mu$			
n	0,9450	0,9750	0,9830	0,9890	0,9958			

3. Theorie der Dispersion. 3a) Elastische Theorie. Die theoretische Deutung der Dispersion bildet eines der wichtigsten Kapitel der Physik, insofern sie den Anstoß zu Hypothesen über den physikalischen Aufbau der Moleküle und Atome gegeben hat. Sowohl die elastische Theorie des Lichtes wie die moderne elektromagnetische Theorie vermögen die Dispersion nicht ohne solche Hypothesen darzustellen. Die elastische Theorie hält bekanntlich das Licht für eine elastische Wellenbewegung des Weltäthers, der sowohl den Weltenraum wie den Raum zwischen den Molekülen der Körper erfüllen soll. Die verschiedene Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes in den verschiedenen Körpern wird entweder durch die verschiedene Dichtigkeit (Fresnel) oder durch die verschiedene Elastizität (Fr. Neumann) des Aethers erklärt, ohne auf den

molekularen Aufbau der Körper irgendwelche Rücksicht zu nehmen. Die Folge ist, daß die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes (wie die der Schallwellen) und damit der Brechungsindex nur abhängig wird von der Elastizität und Dichte des Aethers, nicht aber von der Wellenlänge. D. h. die reine elastische Theorie vermag das Phänomen der Dispersion nicht zu deuten. Aehnlich geht es der Maxwellschen elektromagnetischen Theorie. Diese faßt den Weltäther als einen Isolator (Dielektrikum) auf, und unterscheidet ihn und die körperlichen Isolatoren (Dielektrika) einfach und ausschließlich durch ihre Dielektrizitätskonstante, ohne Rücksicht auf ihren chemisch-molekularen Aufbau. Die Lichtbewegung ist nach ihr eine elektromagnetische Wellenbewegung im Dielektrikum, und da deren Fortpflanzungsgeschwindigkeit nur abhängig ist von der Dielektrizitätskonstanten (und der Magnetisierungskonstanten, deren Einfluß indessen im allgemeinen vernachlässigt werden darf), so ergibt sich wiederum keine Abhängigkeit von der Wellenlänge, d. h. keine Dispersion.

Dagegen kommt man zu einer befriedigenden Darstellung der Dispersion, wenn man die Körpermoleküle nicht außer acht läßt, sondern ihnen einen Einfluß auf die Bewegung des sie umhüllenden Aethers zuschreibt. Zunächst hat Cauchy (1830) nach einem Vorschlage Fresnels bei der Ableitung der elastischen Kräfte des Aethers aus Anziehungs- und Abstoßungskräften zwischen den Aetheratomen die übliche Annahme der Elastizitätstheorie fallen lassen, daß der Radius der Wirkungssphäre der Moleküle klein sei gegenüber der Wellenlänge der elastischen Schwingungen. Bei den sehr kleinen Lichtwellen brauche diese Annahme nicht mehr zuzutreffen.

Er erweitert darum die gewöhnliche Differentialgleichung der elastischen Wellenbewegung

$$\mu \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} \ldots 1)$$

(ξ Aetherverschiebung, t Zeit, z Fortpflanzungsrichtung, μ Dichtigkeit, c Elastizität des Aethers) um Glieder mit höheren Differentialquotienten nach z, wobei dann in der Tat statt der konstanten Fortpflanzungsgeschwindigkeit

$$c = \sqrt{\frac{c}{\mu}} \ldots 2)$$

eine von der Schwingungsdauer (Wellenlänge) abhängige herauskommt, und sich eine sog. Dispersionsformel ergibt:

$$n = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \frac{d}{\lambda^6} + \ldots\ldots \quad 3)$$

worin die a b c d.. Konstante des Mediums bedeuten, welche schnell an Größe abnehmen.

Diese Formel stellt die Dispersion durchsichtiger Körper im sichtbaren Teil des Spektrums, wo die nach unten konvexe Kurve mit abnehmendem λ ansteigt und keinen Wendepunkt enthält, sehr gut dar. Sie behielt daher ihre auf die große Autorität Cauchys begründete Herrschaft so lange bei, als man nur das sichtbare Spektrum und nur Medien mit solchem Verhalten kannte, trotzdem schon bald die auf den Einfluß der Körpermoleküle begründeten und entschieden vollkommeneren Dispersionsformeln, insbesondere die Neumann-Kettelersche auftauchten. Fr. Neumann (1841) entwickelte nämlich die Idee, daß außer den Kräften, welche die Aethermoleküle untereinander ausübten, eine Kraft der Körpermoleküle auf die Aethermoleküle, proportional ihrer relativen Verschiebung gegeneinander, vorhanden sei. Indem er nun die Verschiebung der Körpermoleküle wegen ihrer viel größeren Masse verschwindend klein

$$\mu \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = c \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} - C \xi \ldots\ldots 4)$$

worin $C\xi$ die neue Kraft darstellt. Erweitert man diese Gleichung noch durch die Cauchyschen Glieder, so bekommt man die Dispersionsformel:

$$n^2 = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \cdot \cdot \cdot - e\lambda^2 - f\lambda^4 - \cdot \cdot \cdot \cdot \quad 5)$$

die man unter Vernachlässigungen gewöhnlich schreibt:

$$n^2 = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} - e\lambda^2 \ldots . \quad 6)$$

neben der der Aethermoleküle setzt, kommt er zu folgender Differentialgleichung der Aetherbewegung: und sie in dieser Form, weil Ketteler sie geprüft und auf ihre Ueberlegenheit hingewiesen hat, die Neumann-Kettelersche nennt. Diese Formel stellt die Verhältnisse noch besser dar und gibt auch die allerdings viel später entdeckten Kurven mit Wendepunkten gut wieder. Alle weiteren Theorieen wollen wir hier übergehen. Sie sind fast alle der Neumannschen ähnlich, d. h. sie enthalten die Annahme zwar eines Einflusses, aber der Unbeweglichkeit der Körpermoleküle, die man sich wie Felsen im Meer der Aetherwellenbewegung vorstellt. Infolgedessen mußten sie aufgegeben werden, als das Phänomen der anomalen Dispersion entdeckt wurde, das, wie wir gleich sehen werden, nur dann theoretisch befriedigend gedeutet werden kann, wenn man die Bewegung der Körpermoleküle nicht vernachlässigt. Damit gelangt man ohne weiteres zu präziseren Vorstellungen über den Bau der Moleküle und so dürfen wir den Beginn dieses in der modernen Physik einen breiten Raum einnehmenden Kapitels auf die Entdeckung der anomalen Dispersion und die zuerst von Sellmeier (1871) entwickelten Vorstellungen zurückführen.

Sellmeier geht aus von dem (schon von Kundt erörterten) innigen Zusammenhang zwischen anomaler Dispersion und starker Absorption. Er meint, daß man wegen dieses Zusammenhanges beide aus der gleichen Ursache erklären müsse. Er stellt sich die Körpermoleküle vor als schwingungsfähige Gebilde, sei es, daß sie sich als ganzes gegen eine im Aether feste Gleichgewichtslage bewegen können, sei es, daß (diese Vorstellung hat allerdings erst Helmholtz entwickelt) die Moleküle zusammengesetzt sind aus zentralen im Aether festliegenden und aus beweglichen Teilen. Wie dem auch sei, die beweglichen Teile sollen, wenn sie durch eine äußere Kraft aus ihrer Ruhelage verschoben sind, in die Ruhelage durch eine der Verschiebung proportionale Kraft (nach heutigem Sprachgebrauch eine „quasielastische") zurückgezogen werden. Ein rohes Modell erhält man, wenn man sich das Molekül vorstellt bestehend aus einer großen festliegenden Masse, an welcher eine kleinere Masse mittels einer Spiralfeder befestigt ist. Nimmt man nun weiter die Neumannsche Kraft der Wechselwirkung zwischen Molekülen und Aether, so wird eine in den Körper eindringende Aetherwelle die Moleküle oder ihre bewegli hen Teile (die sämtlich gleichartig sind) in Bewegung zu setzen versuchen, wie die Schallwellen der Luft eine Stimmgabel oder ein Pendel. Nun hat das Molekülgebilde vermöge der quasielastischen Kraft ebensowohl eine Eigenschwingungsdauer, wie ein Pendel oder eine Stimmgabel. Infolgedessen kann man nach dem Resonanzprinzip folgendes voraussehen: Aetherwellen, deren Schwingungsdauer sehr verschieden von der Eigenschwingungsdauer der Moleküle sind, werden sie nur in schwache, sogenannte erzwungene Mitschwingungen versetzen. Aetherwellen, deren Schwingungsdauer genau mit dieser Eigenschwingungsdauer übereinstimmt, werden dagegen nach dem Resonanzprinzip heftiges Mitschwingen der Moleküle veranlassen, genau wie Stimmgabeln kräftig ertönen, wenn sie von Schallwellen ihres Eigentones getroffen werden. Nun nehmen wir (diese Verbesserung hat wiederum Helmholtz an der Sellmeierschen Theorie angebracht) an, daß der Bewegung des Moleküls eine Reibungskraft entgegenwirke, welche proportional der Geschwindigkeit des Moleküls sei. Die Einführung dieser Reibungskraft hat der Theorie bis in die neueste Zeit Kopfschmerzen verursacht, da sich eine plausible Deutung derselben aus irgendwelchen molekulartheoretischen Annahmen nur sehr schwer geben läßt. Uebrigens steht es mit der quasielastischen Kraft nicht viel besser. Wir wollen hier nur andeuten, welche Schwierigkeiten noch zu heben sind und die beiden Kräfte, ohne auf ihre Natur näher einzugehen, als vorhanden annehmen. Man sieht nun ohne weiteres, was geschehen wird, wenn ein Komplex von Aetherschwingungen verschiedener Wellenlänge, d. h. weißes Licht, in den Körper eindringt. Diejenigen Aetherwellen, deren Schwingungsdauer mit der der Körpermoleküle übereinstimmt, werden diese zu heftigem Mitschwingen erregen, und einen großen Teil ihrer Energie an sie abgeben. Diese Energie wird durch die Reibungskraft verzehrt, d. h. in ungeordnete Bewegung der Moleküle, mit anderen Worten in Wärme umgesetzt und ist somit dem Lichte verloren gegangen. Die betreffenden Spektralpartieen erscheinen darum nach dem Durchgange durch den Körper gegenüber den anderen sehr geschwächt, es entsteht ein Absorptionsstreifen im Spektrum. Dieser hat eine gewisse Breite und ist in der Mitte schwärzer als an den Rändern, weil natürlich nicht nur die Lichtwellen der genauen Eigenschwingungsdauer, sondern auch die benachbarten in Mitleidenschaft gezogen werden, wenn auch in schwächerem Maße. Wie weit sich diese Mitwirkung nach beiden Seiten der Eigenschwingungsdauer erstreckt, d. h. wie breit oder wie schmal der Absorptionsstreifen ist, hängt nach der Theorie gedämpfter schwingender Systeme von der Größe der Reibungskraft ab (vgl. den Artikel „Schwingende Systeme"). Somit ist die Absorption befriedigend erklärt, aber auch die Dispersion. Denn das Mitschwingen der Moleküle muß von Einfluß auf die Geschwindigkeit der Aetherwellen sein, und zwar um so mehr, je stärker es erfolgt, d. h. es entsteht die Dispersion. Diese ist für Licht außerhalb des Absorptionsstreifens die glatt verlaufende („homale"), durch die geringe Energieentziehung seitens der Körpermoleküle nur wenig beeinflußte. Dagegen wird sie für das Gebiet des Absorptionsstreifens zur „anomalen", sehr stark und in der experimentell gefundenen Weise beeinflußten.

Man sieht zunächst, daß nach dieser Auffassung jeder Körper, auch die im Sprachgebrauch durchsichtigen, mindestens einen Absorptionsstreifen besitzen muß. Bei den organischen Farbstoffen liegt dieser Streifen im sichtbaren Spektrum, z. B. für Fuchsin im Grün, d. h. die Eigenschwingungsdauer der Fuchsinmoleküle ist gleich der des grünen Lichtes, und darum erscheint uns Fuchsin für grün undurchlässig. Dagegen liegt der Absorptionsstreifen der ungefärbten, im Sprachgebrauch durchsichtigen Körper irgendwo im Infrarot oder Ultraviolett. Sie würden einem auch für diese Strahlen empfindlichen Auge gefärbt erscheinen. Nun zeigt die genauere Untersuchung, daß alle

Tabelle 6. Optische Konstanten des festen Cyanins. Nach Pflüger.

n dir. nach der Methode der prismatischen Ablenkung; n ber. aus der Dispersionsformel berechnet; n refl. nach der Reflexionsmethode gemessen; $\varkappa$ photometrisch bestimmt.

λ	671	656	635	620	589	565	520	505	486	400
n dir.	2,13	2,19	2,10	1,94	1,71	1,39	1,19	1,28	1,40	1,69
n ber.	2,08	2,19	2,10	1,94	1,67	1,43	1,19	1,28	1,39	1,69
n refl.	—	—	2,10	1,93	—	1,40	—	—	—	—
$\varkappa$	0,13	0,27	0,53	0,67	0,69	0,73	0,26	0,15	0,06	0,00

Körper mehrere Absorptionsstreifen besitzen. Selbst die auf weite Erstreckung des Spektrums durchsichtigen, wie Steinsalz und Fluorit, haben Absorptionsstreifen im entferntesten Infrarot und Ultraviolett. Man muß also annehmen, daß sie aus mehreren Molekülgattungen mit verschiedener Eigenschwingungsdauer aufgebaut sind. Jeder Gattung entspricht ein Absorptionsstreifen.

Man sieht nun voraus, welche Gestalt die Dispersionskurve eines solchen Körpers mit mehreren Absorptionsstreifen haben muß (vgl. Fig. 11). Im Durchsichtigkeitsgebiet, zwischen zwei Absorptionsstreifen, zeigt sie homalen, in den Absorptionsstreifen anomalen Verlauf. Ein Wendepunkt muß im Durchsichtigkeitsgebiet auftreten, wenn die Kurve auf der „violetten Seite" des Absorptionsstreifens (d. h. nach den kürzeren Wellenlängen zu) zunächst nach unten konkav ist. Anomale Dispersion ist also nicht ein Ausnahmefall gegenüber der gewöhnlichen, bei durchsichtigen Körpern beobachteten, sondern beide sind Spezialfälle eines allgemeineren Dispersionsgesetzes und müssen somit in einer und derselben Dispersionsformel enthalten sein.

Zu dieser gelangt man, wenn man die Sellmeier-Helmholtzschen Annahmen mathematisch darstellt. Da im Gegensatz zu den älteren Theorieen die Bewegung der Körpermoleküle nicht verschwindend klein gesetzt wird, muß sie durch eine besondere Gleichung dargestellt werden, welche zu der Aethergleichung hinzutritt. Die Theorie geht also von zwei simultanen Differentialgleichungen aus. Die erste ist die der Aetherbewegung, vervollständigt durch das Neumannsche Glied der Wechselwirkung zwischen Aether und Molekülen:

$$\mu \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} = e \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} + C(x - \xi) \ldots . 7)$$

wo x die Verschiebung der Moleküle, also $x - \xi$ die relative Verschiebung Molekül gegen Aether ist, auf die es bei Bildung dieses Gliedes ankommt.

Die zweite ist die Bewegungsgleichung der Moleküle, die wir analog der des gedämpft (mit Reibung) schwingenden Pendels bilden:

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = - a x - C(x - \xi) - \gamma \frac{\partial x}{\partial t} \ldots . 8)$$

Darin ist m die (auf die Volumeinheit bezogene) Masse des Moleküls, d. h. die Dichte, das erste Glied rechts die der Verschiebung proportionale quasielastische Kraft, das zweite die mit umgekehrtem Zeichen zu nehmende Wechselwirkungskraft, das dritte die der Geschwindigkeit des Moleküls proportionale Reibungskraft; negative Vorzeichen, weil der Bewegung entgegenwirkend. Die Integration dieser Differentialgleichungen führt charakteristischerweise zu zwei Dispersionsformeln, welche sowohl n als auch $\varkappa$ als Funktion der Wellenlänge ergeben. Sie lauten in der heute gültigen, aus der von Ketteler etwas modifizierten Sellmeier-Helmholtzschen, wie aus der Helmholtzschen elektromagnetischen Theorie folgenden Form:

$$n^2 - \varkappa^2 - 1 = \frac{D \lambda^2 (\lambda^2 - \lambda_m^2)}{(\lambda^2 - \lambda_m^2)^2 + g^2 \lambda^2} \ldots . 9)$$

$$2 n \varkappa = \frac{D g \lambda^3}{(\lambda^2 - \lambda_m^2)^2 + g^2 \lambda^2}.$$

Darin ist D eine mit den Aether- bezw. Körperdichtigkeiten, g eine mit der Reibung zusammenhängende Konstante, λ_m die Wellenlänge der Eigenschwingung.

Wenn der Körper mehrere Absorptionsstreifen, d. h. mehrere Molekülgattungen enthält, so bekommt man für jede Gattung 2 Differentialgleichungen, und als deren Auflösungen wieder die Beziehungen (9) mit einem Summenzeichen rechts, d. h. so viele gleichgebaute Glieder mit je drei Konstanten, als Gattungen vorhanden sind. Berechnet man dann schließlich die Dispersionskurve, d. h. n als $f(\lambda)$, so zeigt sie genau den in Figur 11 gezeichneten Verlauf.

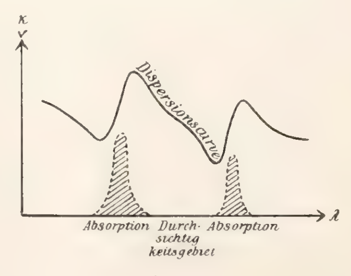


Fig. 11.

Zugleich stellt sich heraus, daß auf der violetten Seite eines Absorptionsstreifens Werte von n kleiner als 1, d. h. Lichtgeschwindigkeiten größer als im freien Weltäther vorkommen können, wie sie tatsächlich z. B. beim Fuchsin gefunden worden sind. Endlich bekommen wir $\varkappa = f(\lambda)$, d. h. die Extinktionskurve in Form eines Berges, wie in Figur 11 punktiert eingezeichnet. Daß die Theorie mit der Erfahrung sehr gut im Einklang steht, zeigt Figur 8 und Ta-

belle 5, in welcher für den Farbstoff Cyanin die beobachteten und aus Formel 9 berechneten Werte zusammengestellt sind. $\varkappa$ wurde dabei durch direkte Messung der Lichtabsorption einer dünnen, auf Glas ausgebreiteten Cyaninschicht mittels des Photometers bestimmt.

Aus diesen vollständigen sogenannten Ketteler-Helmholtzschen Dispersionsformeln (9) kann man eine vereinfachte, nur im Durchsichtigkeitsgebiet gültige Formel ableiten. In diesem Gebiet ist die Absorption praktisch zu vernachlässigen, d. h. es ist $\varkappa = 0$. Ferner ist g, wie die Erfahrung ergibt, eine sehr kleine Zahl, und da wir im Durchsichtigkeitsgebiet sehr weit von der Mitte des Absorptionsstreifens entfernt sind und darum $(\lambda^2 - \lambda_m{}^2)^2$ groß ist, kann das Glied $g^2\lambda^2$ gegen dieses im Nenner vernachlässigt werden. Man bekommt somit

$$n^2 - 1 = \Sigma \frac{D\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda^2_m} \quad \ldots . \; 10)$$

Aus dieser Gleichung läßt sich durch Reihenentwickelung die Neumann-Kettelersche Dispersionsformel (6) ableiten, die sich somit in der neuen Theorie als eine bloße Interpolationsformel, deren Konstanten keine physikalische Bedeutung haben, erweist.

Formel 10 stellt zugleich die ursprüngliche, sogenannte Sellmeiersche Dispersionsformel dar, die sich aus der Sellmeierschen, das Helmholtzsche Reibungsglied nicht enthaltenden Theorie ergibt. Sie hat den Nachteil, daß für die Mitte des Absorptionsstreifens, d. h. für $\lambda = \lambda_m$, der Nenner Null, und darum $n = \pm\infty$ wird, was physikalisch unmöglich ist. Die Formel ist darum nur bis in einige Nähe der Absorptionsmitte λ_m anwendbar; sie leistet infolge ihrer Einfachheit gute Dienste zur Darstellung der Dispersion der Dämpfe mit sehr schmalen Absorptionslinien. Zur Darstellung der Dispersion im Durchsichtigkeitsgebiet fester und flüssiger Körper kann man sie entweder in der einfachen Neumann-Kettelerschen, oder in einer je nach den besonderen Verhältnissen möglichst bequem zugestutzten Form verwenden. Z. B. hat Martens ihr für Steinsalz die Form gegeben:

$$n^2 = a + \frac{D_{v_1}\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda^2{}_{v_1}} + \frac{D_{v_2}\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda^2{}_{v_2}} + \frac{D_{r_1}\lambda^2}{\lambda^2{}_{r_1} - \lambda^2} - e\lambda^2 \quad \ldots . \; 11)$$

Diese Formel ergibt sich folgendermaßen. Man schreibt dem Steinsalz im Ultraviolett zwei Absorptionsstreifen mit der mittleren Wellenlänge λ_{v_1} und λ_{v_2} zu, deren Einfluß durch das zweite und dritte Glied rechts dargestellt wird. Im Infrarot existieren ebenfalls mehrere Streifen, von denen aber nur einer mit der Wellenlänge λ_{r_1} durch das vollständige vierte Glied, der Einfluß der übrigen und etwa anderer noch vorhandener ultravioletter Streifen durch a und $e\lambda^2$ ausgedrückt wird. Es ist Sache des Probierens, wie weit man mit solcher Vereinfachung der Formel 10 gehen darf, und auch das Vorhandensein der Absorptionsstreifen und ihrer Lage im Spektrum wird häufig nicht nur durch Experiment festgestellt, sondern in Ermangelung dessen durch Probieren gefunden. Die Genauigkeit der Formel 11 zeigt Tabelle 3, in welcher hinter den für Steinsalz experimentell bestimmten Zahlen die nach 11 berechneten in Klammern aufgeführt sind.

3b) Elektromagnetische Theorie. Zu denselben Ergebnissen wie die elastische Lichttheorie führt auch die elektromagnetische Lichttheorie, nachdem man analoge Spezialannahmen eingeführt hat. Man schreibt den Molekülen elektrische Ladungen zu, sei es, daß man sie als Paar verbundener, positiv und negativ geladener Ionen auffaßt (Helmholtz), sei es, daß man mit dem elektrisch neutralen chemischen Atom Elektronen, d. h. Atome der Elektrizität, durch quasielastische Kräfte verkettet denkt. Die Ionen und Elektronen werden dann durch die periodisch wechselnde elektrische Kraft der Lichtwellen in Bewegung versetzt, und in dieser Bewegung durch eine Reibungskraft gedämpft. Die übrigen Schlußfolgerungen, insbesondere die Anwendung des Resonanzprinzips bleiben dieselben und führen zu den Dispersionsformeln (9). Meinungsverschiedenheiten ergeben sich dann insbesondere darüber, welches die auf ein Elektron wirkende elektrische Kraft und welches die Deutung der Reibungskraft sei (Lorentz, Planck).

Von großer Wichtigkeit ist nun die berühmte, von Maxwell aus seiner elektromagnetischen Lichttheorie abgeleitete Beziehung

$$n = \sqrt{\varepsilon}$$

wo ε die Dielektrizitätskonstante bedeutet. Solange man darin ε, also auch n, als eine absolute Konstante des Dielektrikums betrachtet, drückt sie die Tatsache aus, daß die reine Maxwellsche Theorie keine Dispersion kennt. Dann wäre die Beziehung einfach falsch. Z. B. ist für Wasser $\sqrt{\varepsilon} = 9$, n aber im Mittel im sichtbaren Spektrum ungefähr 1,33. Nun kann man aber die Beziehung im Lichte der Dispersionstheorie folgendermaßen auffassen. ε wird gewöhnlich (z. B. nach der Kondensatormethode) mit ruhenden Elektrizitätsmengen oder mit langsamem Wechselstrom, d. h. mit elektromagnetischen Schwingungen von gegen Lichtschwingungen unendlich großer Schwingungsdauer und damit unendlich langer Wellenlänge gemessen. Also muß man unter n den Brechungsindex für unendlich lange Wellen verstehen, der sich aus der Dispersionsformel ergibt, wenn man darin $\lambda = \infty$ setzt. Man erhält dann z. B.:

	$n^2\infty$	ε
Schwefelkohlenstoff	2,51	2,61
Benzol	2,18	2,25
Xylol	2,17	2,35

also ganz gute Uebereinstimmung.

Die Dispersion der Metalle, d. h. der leitenden Substanzen bedarf wiederum zu ihrer theoretischen Darstellung besonderer Annahmen, z. B. in der Elektronentheorie der Annahme sog. freier Elektronen, aus denen ihre Eigentümlichkeiten, wie z. B. die nach Tabelle 4 mit λ nur fallenden oder steigenden Dispersionskurven folgen.

Von Interesse ist die Frage, ob der freie Weltäther Dispersion zeige. Vom Standpunkte der Theorie ist diese Frage mangels der Anwesenheit körperlicher Moleküle zu verneinen, und in der Tat haben sinnreiche Beobachtungen über die Geschwindigkeit der von Sternen uns zugesandten verschiedenfarbigen Strahlen bisher innerhalb der Beobachtungsfehler keine Dispersion ergeben.

Literatur. *Die Literatur ist aufgeführt in* ***Kaysers*** *Handbuch der Spektroskopie, Bd. 4. Leipzig 1908. — Zu den Meßmethoden ist zu vergleichen* ***F. Kohlrausch,*** *Leitfaden. Leipzig 1910.*

A. Pflüger.

Lichtelektrische Erscheinungen.

1. Definition und Einteilung. 2. Normaler Photoeffekt. Grundversuch an Metallen. 3. Lichtelektrische Elektronen und Kanalstrahlen. 4. Anwendung lichtelektrischer Elektronen. 5. Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen. 6. Abhängigkeit der Anfangsgeschwindigkeit von der Lichtfrequenz. 7. „Wahre" Anfangsgeschwindigkeit. 8. Ihre absolute Größe. 9. Einflußlosigkeit der Temperatur und der Orientierung des elektrischen Lichtvektors. 10. Zahl der Elektronen. 11. Langwellige Grenze des normalen Effektes. 12. Absolute Zahl der Elektronen. Oberflächeneinflüsse und Ermüdung. 13. Theorie des normalen Photoeffektes. 14. Anwendungen des normalen Photoeffektes. 15. Der selektive Photoeffekt an Metallen. 16. Orientierung des Lichtvektors. 17. Abhängigkeit vom Einfallswinkel. 18. Selektiver Effekt und Stellung des Metalles im periodischen System der Elemente. 19. Eigenfrequenzen und spektrale Breite. 20. Experimentelles. 21. Theorie des selektiven Photoeffektes. 22. Lichtelektrische Erscheinungen an Nichtmetallen und Flüssigkeiten. 23. Beziehung zur Phosphoreszenz und Fluoreszenz. 24. Lichtelektrische Erscheinungen an Gasen.

1. Definition und Einteilung. Als lichtelektrische Erscheinungen faßt man die Tatsachen zusammen, bei denen die Absorption des Lichtes mit einer Emission negativer elektrischer Elementarquanta, d. h. Elektronen, verbunden ist. Man trennt aus äußeren Gründen die lichtelektrischen Erscheinungen an Metallen, von denen an nicht metallischen Oberflächen und Gasen. Am besten untersucht sind die lichtelektrischen Erscheinungen an M e t a l l e n, bei denen man zwei Gruppen zu unterscheiden hat: den „normalen" und den „selektiven" lichtelektrischen Effekt (Photoeffekt).

2. Der normale lichtelektrische Effekt. Fällt Licht (Fig. 1) von der Wellenlänge $\lambda < 250\ \mu\mu$ auf eine Platte aus beliebigem Metall A, das sich in einem stark evakuierten Glasgefäß G befindet, so zeigt ein an A angeschlossenes Elektrometer oder Elektroskop, daß A eine positive Ladung enthält, daß also durch das Licht negative Ladung von A entfernt wird. Diese negative Ladung läßt sich ebenfalls leicht elektrometrisch an einer A gegenübergestellten Metallplatte B nachweisen. Dies ist der einfache G r u n d v e r s u c h aller lichtelektrischen Erscheinungen.

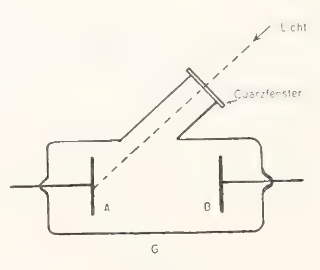


Fig. 1.

Zur Technik des Versuches sei bemerkt, daß die Evakuierung des Gefäßes zweckmäßig mit Kokusnußkohle und flüssiger Luft erfolgt, daß A (z. B. Al, Zn, Cu, Pt) mechanisch ohne schmierende Poliermittel gesäubert und B vor reflektiertem Lichte geschützt wird. G wird in der Regel an der Innenwand mit einem Drahtnetz zur Vermeidung elektrostatischer Störungen ausgekleidet. Als Strahlungsquelle für $\lambda < 250\ \mu\mu$ empfiehlt sich eine Quarzquecksilberlampe, Bogenlicht zwischen Eisenelektroden oder Flaschenfunken zwischen Metallen wie Cd, Al, Zn.

3. Lichtelektrische Elektronen und Kanalstrahlen. Es ist das große Verdienst L e n a r d s (1899), nachgewiesen zu haben, daß die negative Elektrizität A unter der Einwirkung des Lichtes in Form von E l e k t r o n e n verläßt, die sich genau wie die auf elektrischem Wege erzeugten Kathodenstrahlen in geradlieniger Bahn fortpflanzen. Doch gelingt der Nachweis dieses Elektronenstrahlencharakters der lichtelektrisch erzeugten Träger im allgemeinen nur mit großer Schwierigkeit, da die Elektronen das Metall in der Mehrzahl der Fälle nur mit geringen Geschwindigkeiten ($0{,}5$—$1{,}0 . 10^{-8}$ cm/sec) verlassen, der Absorptionskoeffizient der Strahlen infolgedessen groß ist und die Elektronen schon nach wenigen mm Wegstrecke durch Zusammenstöße mit den Gasmolekülen gänzlich diffus verlaufen. Doch hilft ein ein-

facher Kunstgriff über diese Schwierigkeiten hinweg (Fig. 2.): A sei wieder die vom Lichte getroffene Metallplatte, B eine doppelte

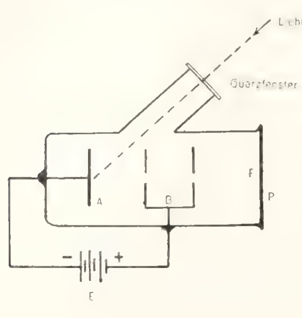


Fig. 2.

Blende und P ein Phosphoreszenzschirm, etwa Willemit. Zwischen A und B kann mittels der Batterie E ein elektrisches Feld erzeugt werden, das die Elektronen beschleunigt und bei einer Differenz von 10^4 Volt zwischen A und B die Geschwindigkeit der an A ausgelösten Elektronen auf $v = 5,7 . 10^9$ cm/sec. erhöht. Dann erhalten wir auf P einen wohldefinierten Phosphoreszenzfleck F, genau wie bei Kathodenstrahlen in einem Hittorfschen Entladungsrohr und an dem auf diese Weise sichtbar gemachten Elektronenbündel lassen sich nun alle für Kathodenstrahlen, d. h. Elektronen charakteristischen Versuche nachweisen (Lenard). So z. B. die elektrostatische und magnetische Ablenkbarkeit und aus der Kombination beider das Verhältnis von Ladung zur Masse des Elektrons, das in der Größenordnung durchaus mit dem für die Kathodenstrahlen gefundenen Wert $\frac{e}{m} = 1,7 . 10^7$ elektromagnetische Einheiten übereinstimmt.

$\frac{e}{m}$ hat sich bei den lichtelektrischen Elektronen in älteren Messungen zu klein ergeben (Lenard $1,2 . 10^7$; J. J. Thomson $0,7 . 10^7$, 1899) doch beruhen diese Abweichungen mit großer Wahrscheinlichkeit auf Mängeln der Anordnung (Alberti 1911). Hupka hat (1910) lichtelektrische Elektronen im Gebiet von 3 bis $10 . 10^4$ Volt beschleunigt, d. h. bis zu 0,6 Lichtgeschwindigkeit und Messungen über die Abhängigkeit der Elektronenmasse von der Geschwindigkeit angestellt, die er zugunsten der „Relativtheorie" zu deuten sucht. Bei Verwendung durchbrochener Metallplatten und beschleunigender Spannung hat Dember auf der dem Lichte abgewandten Seite positive Elektrizitätsträger wahrgenommen, die er in Analogie zum elektrischen Entladungsrohr als „Kanalstrahlen" bezeichnet.

4. Anwendung lichtelektrischer Elektronen. Lichtelektrisch erzeugte und beschleunigte Elektronen sind bei all den Versuchen besser als Kathodenstrahlen anzuwenden, bei denen es auf Strahlen homogener, wohldefinierter Geschwindigkeit ankommt, so z. B. Untersuchungen von Absorptionskoeffizienten, Reflexion und Sekundärstrahlungen.

5. Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen. Die Elektronen des normalen Photoeffektes verlassen das Metall mit einer von Null verschiedenen Anfangsgeschwindigkeit. Dies zeigt sich an der positiven Selbstaufladung einer bestrahlten Platte. Doch wird bei dieser Selbstaufladung unter gegebenen Bedingungen ein gewisser Wert des positiven Potentiales relativ zur Umgebung nicht überschritten und bei diesem Potential von A (Fig. 1) erhält auch B keine negative Ladung mehr, d. h. die Elektronen können A nicht mehr verlassen. In diesem Falle ist die kinetische Energie eines Elektrons gleich der elektrischen Arbeit geworden, die das Elektron gegen das Potential V zu leisten hat, d. h. es ist

$$\frac{1}{2} m v^2 = eV \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

wenn m die Masse, v die Geschwindigkeit und e die Ladung des Elektrons bedeutet und V das maximale, in Volt gemessene positive Potential der Selbstaufladung aufgibt. V ist somit ein Maß für die Geschwindigkeit, mit der das Elektron das Metall verläßt und es ist üblich und bequem, die Geschwindigkeit von Elektronen „in Volt" anzugeben. Um die Geschwindigkeit der Elektronen dann in cm/sec. zu erhalten, hat man dann nach 1) nur die Wurzel aus der Volt-Zahl mit $5,7 . 10^7$ zu multiplizieren $\left(\frac{e}{m} = 1,77 . 10^7 \text{ c.g.s elektromag. eingesetzt}\right)$.

6. Abhängigkeit der Anfangsgeschwindigkeit von der Lichtfrequenz. Mit großer Wahrscheinlichkeit entspricht einer einheitlichen Wellenlänge des erregenden Lichtes eine einheitliche Geschwindigkeit der emittierten Elektronen, oder wenigstens ein sehr enger Geschwindigkeitsbereich (Ladenburg und Markau 1908). Zum Nachweis dieser Tatsache bedient man sich wieder der Anordnung der Figur 1, benutzt aber monochromatisches Licht konstanter Intensität (Linie einer Hg-Lampe), und vermeidet an allen Metallteilen diffuse Reflexion oder Sekundärstrahlung der Elektronen, nach dem Verfahren v. Baeyers, indem man z. B. alle Metallteile mit einem berußten Drahtnetz umkleidet. Ferner verwendet man eine Batterie, um zwischen A und B beliebige, die Elektronen beschleunigende oder verzögernde elektrische Potentialdifferenzen herzustellen und mißt mittels eines empfindlichen Strommessers (z. B. Quadrantelektrometer

an den Enden eines großen Widerstandes) die Elektrizitätsmenge, die B in 1 Sek. erreicht und die der Zahl der aufgefangenen Elektronen proportional ist. Trägt man dann die Zahl der Elektronen, die A verläßt und B erreicht, als Funktion der verzögernden oder beschleunigenden Spannungen auf, so sieht man Figur 3, das in unserem Beispiele bei 4 Volt verzögernder Spannung gar keine Elektronen, bei 2,5 Volt verzögernder Spannung hingegen alle Elektronen A verlassen und B erreichen, während selbst hohe beschleunigende Felder die Zahl der Elektronen nicht mehr vergrößern. Die Anfangs-

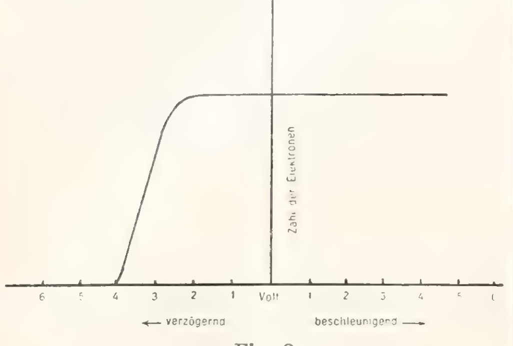


Fig. 3.

geschwindigkeiten der Elektronen liegen also hier zwischen den engen Grenzen von 2,5 und 4 Volt. Leider fehlen aber bisher Untersuchungen in streng monochromatischem Licht. Die hier mitgeteilten Messungen gehören zu einem Wellenlängenintervall von 20 bis 30 $\mu\mu$ Breite und es ist noch unentschieden, ob einer wirklich monochromatischen Strahlung nur eine einzige Geschwindigkeit oder ein enger Geschwindigkeitsbereich entspricht.

Unterläßt man die Beseitigung der Reflexion und Sekundärstrahlung, so zeigt die Kurve der Figur 3 einen viel flacheren Anstieg, der horizontale Teil beginnt erst bei beschleunigenden Spannungen und in der Nähe von 0 Volt erscheint in der Kurve ein Knickpunkt. Lenard sieht in dieser Formänderung keine Entstellung durch die Reflexion usw., sondern glaubt sie durch die Existenz einer die Elektronen verzögernden Oberflächenkraft am Metall erklären zu müssen.

Die obere Grenze der Anfangsgeschwindigkeit, also bei spektral unzerlegtem Licht die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen, kann man natürlich auch ohne Hilfsspannung und ohne Strommessung ermitteln, indem man A, Figur 1, gegen B und die übrigen Metallteile isoliert und das maximale positive Aufladungspotential mißt, das A bei Bestrahlung annimmt.

7. „Wahre" Anfangsgeschwindigkeit. Von der „beobachteten" oder „äußeren" Anfangsgeschwindigkeit wird man wahrscheinlich die „wahre" oder innere Anfangsgeschwindigkeit, die die Elektronen im Innern des Metalles bei der Erzeugung oder Auslösung erhalten, zu unterscheiden haben. Durch Oberflächeneinflüsse dürften die beobachteten Geschwindigkeiten im allgemeinen kleiner und infolge von Absorption vielleicht auch weniger homogen sein, als die wahren.

8. Absolute Größen der Anfangsgeschwindigkeit. Ueber die absolute Größe der Anfangsgeschwindigkeiten beim normalen Photoeffekt, ihre Abhängigkeit von der Wellenlänge des erregenden Lichtes, der Natur und der Oberflächenbeschaffenheit der Metallplatte herrscht noch vollständiges Dunkel. Ladenburg hatte gefunden, daß die Anfangsgeschwindigkeiten proportional der Frequenz des erregenden Lichtes in die Höhe gehen und hatte z. B. für Platin, das während der Evakuierung als Elektrode einer Gasentladung gedient hatte, die Zahlen der Figur 4 erhalten. Hull glaubte diesen linearen Zusammenhang mit der Frequenz des Lichtes auch für die Wellenlängen unter 200 $\mu\mu$ (Schumann strahlen) bestätigen zu können.

Fig. 4.

Millikan glaubt jedoch, daß die Ladenburgschen Werte der Geschwindigkeiten zu klein sind, er erreichte bei $\lambda = 254$ bis 180 $\mu\mu$ durch langdauernde Bestrahlung der Oberfläche Werte bis zu 20 Volt und darüber, und es ist heute unentschieden, ob überhaupt für eine Wellenlänge für ein bestimmtes Metall eine charakteristische, oder gar für alle Metalle gleiche, Anfangsgeschwindigkeit existiert. Des-

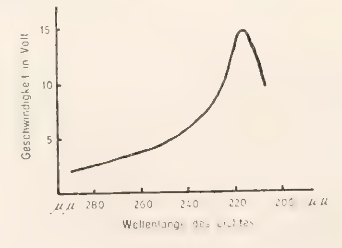


Fig. 5.

gleichen ist auch der lineare Zusammenhang der Geschwindigkeit mit der Lichtfrequenz in Frage gezogen, da Wright bei lange

bestrahlten Al-Platten ein Maximum der Geschwindigkeit von 14 Volt bei $\lambda = 217\ \mu\mu$ gefunden hat, wie Figur 5 veranschaulicht. Die Frage nach der Geschwindigkeit der Elektronen hängt eben aufs engste mit der Oberflächenbeschaffenheit des Metalls zusammen, d. h. der oberflächlichen Okklusion von Gasen, dem Voltaeffekt, Polarisationserscheinungen (v. Baeyer und Tool) und ähnlichen ungeklärten Erscheinungen, die an der Grenzfläche zwischen Metall und Gas stattfinden. Dabei ist zu bedenken, daß selbst bei dem besten herstellbaren Vakuum von etwa 10^{-5} mm Hg die Zahl der Gasmoleküle in ccm immer noch 10^{12} beträgt.

9. Einflußlosigkeit der Temperatur und der Orientierung des elektrischen Lichtvektors. Soweit die Oberflächenbeschaffenheit der Platte keine Aenderung erfährt, sind die Geschwindigkeiten der Elektronen von der Temperatur im Gebiete von -180^0 bis $+860^0$ unabhängig (Lienhop, Millikan und Winchester, Ladenburg).

Auch die Orientierung des elektrischen Lichtvektors ist auf die Anfangsgeschwindigkeit beim normalen Photoeffekt, gleichgültig, ob das Metall flüssig oder fest ist, ohne Einfluß (Pohl). Eine Vorzugsrichtung der Emission unter einem bestimmten Austrittswinkel ist nicht sicher erwiesen, vielleicht verlassen die Elektronen das Metall gleichmäßig in allen Richtungen, analog der korpuskularen Strahlung der radioaktiven Substanzen.

10. Zahl der Elektronen. Die Zahl der Elektronen, die unabhängig von der Lichtintensität im normalen Photoeffekt von der gleichen Lichtenergie erzeugt wird, geht mit abnehmender Wellenlänge ständig in die Höhe (Ladenburg, Pohl und Pringsheim). Figur 6 gibt eine charakteristische Kurve für K-Hg.

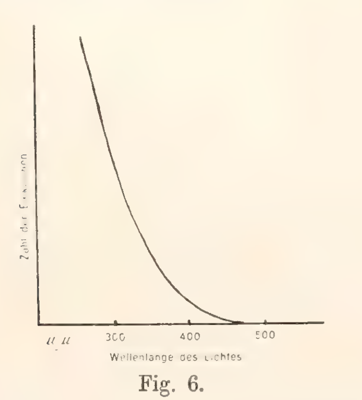


Fig. 6.

11. Langwellige Grenze des normalen Effektes. Die Faktoren, die dabei die langwellige Grenze des normalen Effektes bestimmen, sind noch nicht aufgeklärt. Im allgemeinen scheint der Effekt um so weiter zu langen Wellen zu gehen, je oxydierbarer die Metalle sind und in Metalllegierungen scheint die Grenze eines bestimmten Metalles um so mehr durch die zweite (edlere) Komponente der Legierung nach höheren Frequenzen zurückgedrängt zu werden, je größer der chemische Abstand beider Metalle im periodischen System der Elemente ist (Elster und Geitel, Pohl und Pringsheim).

Die langwellige Grenze des normalen Photoeffektes ist für verschiedene Metalle angenähert die folgende (Pohl und Pringsheim): Hg 260 $\mu\mu$, Sn 320, Pb 330, Tl 370 $\mu\mu$ usw.

Durch derartige Reihen sind die früher in spektralunzerlegtem Lichte aufgestellten „Reihenfolgen der lichtelektrischen Empfindlichkeit“ zu ersetzen.

Die Orientierung des elektrischen Lichtvektors ist ohne Einfluß, d. h. an einer optisch spiegelnden Fläche beeinflußt Azimut und Einfallswinkel des polarisierten Lichtes die Zahl der Elektronen nur insoweit, als beide die Absorption des Lichtes bedingen (Pohl).

12. Absolute Zahl der Elektronen. Die absolute Zahl der Elektronen, die von der Einheit absorbierter Lichtenergie betimmter Frequenz emittiert sind, ist noch unbekannt. Die relativen Zahlen hängen in ähnlicher Weise und wahrscheinlich aus gleicher Ursache wie die Anfangsgeschwindigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit des Metalles ab. Zeitliche Aenderung der letzteren, insbesondere die Adsorption von Ozon, das die Elektronen absorbiert, erklärt nach Hallwachs die dauernde Empfindlichkeitsabnahme, die als lichtelektrische Ermüdung der Metalle bekannt ist.

Von dem Einfluß von Temperaturänderungen gilt das gleiche, was bei den Anfangsgeschwindigkeiten gesagt wurde.

13. Theorie des normalen Photoeffektes. Eine allseitig anerkannte Theorie des normalen Photoeffektes fehlt zurzeit noch. Einstein hat mit der Gleichung 1) die Gleichung

$$h\nu = \frac{1}{2} m v^2 \qquad \ldots\ldots 2)$$

in der ν die Frequenz des Lichtes und $h = 6{,}5 \cdot 10^{-27}$ gcm²/sec das Wirkungselement der Planckschen Strahlungstheorie bedeutet, kombiniert, d. h. die Hypothese eingeführt, daß je ein ungeteiltes Energieelement der absorbierten Lichtenergie der Frequenz ν in die kinetische Energie eines ausgelösten Elektrons verwandelt wird. So ergibt sich die Anfangsgeschwindigkeit in Volt

$$V = \frac{h\nu}{e} \qquad \ldots\ldots\ldots 3)$$

Dabei ist vorausgesetzt, daß die „beobachtete" Geschwindigkeit von der „wahren" nicht merklich verschieden ist. Andernfalls ist eV in (1) durch (eV + Ø) zu ersetzen, wo Ø die „Austrittsarbeit" des Elektrons an der Oberfläche bedeutet.

Gleichung (3) ergibt für $\lambda = 200\ \mu\mu$ eine Geschwindigkeit von 6,3 Volt, also die Größenordnung der beobachteten Zahlen. Auch folgt, da h ν vom Material, der Temperatur und der Lichtintensität unabhängig ist, die beobachtete Unabhängigkeit der Geschwindigkeit von diesen drei Größen. Besonders spricht aber zugunsten der Einsteinschen Theorie, daß sie auch für die von Röntgenstrahlen erzeugten Elektronen die hohen gemessenen Geschwindigkeiten der Größenordnung 10^4 bis 10^5 Volt ergibt, wenn man für die Wellenlänge oder Impulsbreite Werte von der Ordnung 10^{-9} cm einsetzt, wie sie als oberer Grenzwert mit den Beugungsversuchen von Walter und Pohl in Einklang stehen.

14. Anwendungen des normalen Photoeffektes. 1. Durch die lichtelektrisch ausgelösten Elektronen läßt sich die von Warburg entdeckte Verzögerung der Funkenentladung herabsetzen. In dieser Form hat H. Hertz (1887) die erste lichtelektrische Erscheinung beobachtet (Hertz-Effekt).

Zickler hat diesen Effekt für eine Telegraphie mit ultraviolettem Licht praktisch zu verwerten gesucht.

2. Man kann negativ geladene Körper im gaserfüllten Raum entladen. In dieser Form hat Hallwachs (1887) den lichtelektrischen Effekt zuerst beobachtet (lichtelektrische Zerstreuung, Hallwachs-Effekt). Die Entladung einer blanken Zinkplatte, die mit einem Braunschen Elektrometer in Verbindung steht, bildet einen bekannten Vorlesungsversuch (Bogenlampe oder Sonnenlicht).

Bestrahlte lichtelektrische Elektroden können an Stelle von Tropfelektroden u. dgl. zu Sonden bei der Ausmessung elektrischer Felder benutzt werden (Dember).

3. Es lassen sich unipolare, negative Oberflächenionisationen erzeugen, wie sie z. B. zur Messung der Ionenbeweglichkeit von Gasen nach Rutherfords Wechselstrommethode gebraucht werden.

4. Es werden „lichtelektrische Zellen" hergestellt, d. h. gaserfüllte Gefäße analog der Figur 1, bei denen nicht nur der Elektronenstrom allein gemessen wird, sondern die Elektronen durch starke elektrische Felder zwischen A und B beschleunigt werden, um durch Ionenstoß einen starken Ionisierungsstrom zu erzeugen, der leicht galvanometrisch meßbar wird. Derartige Zellen sind häufig für Photometrierungen verwandt (Elster und Geitel).

15. Der selektive Photoeffekt an Metallen (R. Pohl und P. Pringsheim 1910). Der selektive Photoeffekt tritt stets neben dem normalen auf, ist aber auf ein enges Wellenlängengebiet beschränkt. In diesem überlagert sich dem normalen Photoeffekt, der in Figur 7 als punktierte Kurve dargestellt ist, der selektive in Form der

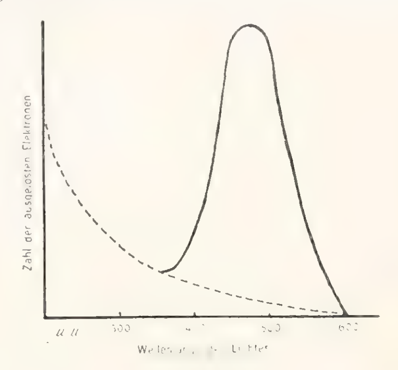


Fig. 7.

ausgezogenen Kurve, die in ihrer Form einer Resonanzkurve gleicht. Der selektive Effekt wird nur von solchem Lichte erzeugt, das eine senkrecht zur Metalloberfläche gerichtete Komponente des elektrischen Vektors besitzt.

16. Orientierung des Lichtvektors. Die Orientierung des elektrischen Vektors ist im Gegensatz zum normalen Photoeffekt von grundsätzlicher Bedeutung. Ist das erregende Licht in der Einfallsebene polarisiert, so daß der elektrische Vektor senkrecht zu dieser schwingt, oder fällt das Licht, sei es natürlich, sei es polarisiert, in senkrechter Inzidenz auf eine optische spiegelnde Metallfläche, so fehlt der selektive Effekt. Dies veranschaulicht die Figur 8

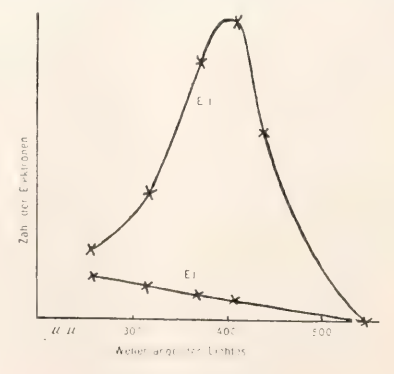


Fig. 8.

an dem praktischen Beispiel der flüssigen K-Na-Legierung in der mit E I gezeichneten Kurve. Darüber ist mit E II die Kurve gezeichnet, bei der ein in der Einfallsebene

schwingender elektrischer Vektor einen starken selektiven Effekt erzeugt.

17. Abhängigkeit vom Einfallswinkel. Die Zahl der Elektronen, die von der gleichen Menge absorbierten Lichtes erzeugt werden, wächst ständig mit zunehmendem Einfallswinkel und strebt für streifende Inzidenz einem endlichen Grenzwert zu. Gleichzeitig ändert sich das Bild der Kurven, die bei einem Einfallswinkel von 60° in Figur 8 fast symmetrisch verläuft, in dem Sinne, daß sie bei großen Einfallswinkeln stark unsymmetrisch auf seiten der kleineren Lichtfrequenzen einen flacheren Abfall ergibt, wie es dem Verlauf einer Resonanzkurve bei starker Dämpfung entspricht. Um das wahre Bild der Resonanz zu erhalten, muß man auf streifende Inzidenz extrapolieren, d. h. den Grenzfall, in dem die Absorption des Lichtes und die Erzeugung der Elektronen in einer unendlich dünnen Schicht stattfindet, die nicht durch einseitige Absorption die Zahl der — vermutlich langsameren — Elektronen kleinerer Frequenz zu klein erscheinen läßt. Die Zahl der vom selektiven Effekt erzeugten Elektronen beträgt bei großem Einfallswinkel oft das Mehrhundertfache des zu gleicher Wellenlänge gehörigen normalen Effektes, so daß die Metalle außerordentlich ausgeprägte Maxima ihrer „Lichtempfindlichkeit" besitzen können.

18. Selektiver Effekt und Stellung des Metalls im periodischen System der Elemente. Der selektive lichtelektrische Effekt ist bisher nur bei den Metallen der Alkali- und einigen der Erdalkaligruppe beobachtet. Gleichzeitig ist festgestellt, daß die übrigen Metalle (vielleicht außer Gold und Silber) oberhalb von 200 $\mu\mu$ keine selektiven Gebiete besitzen. Wohl aber zeigen Legierungen der Alkalimetalle unter sich oder mit anderen Metallen selektive Effekte, und zwar wird die Eigenfrequenz durch das zweite Metall um so mehr in Richtung kleinerer Wellenlängen verschoben, je weiter die zweite Komponente von der ersten im periodischen System der Elemente chemisch entfernt steht.

19. Eigenfrequenzen und spektrale Breite. In der Tabelle sind die Eigenfrequenzen der bisher bekannten selektiven Effekte zusammengestellt. Die spektrale Breite des Resonanzgebietes wächst mit steigender Frequenz. Die Kurven werden flacher und flacher, gleichzeitig steigt (vgl. Fig. 7) der stets als additive Größe mit gemessene normale Effekt rapide und daher dürften selektive Effekte unterhalb von $\lambda = 200$ $\mu\mu$ schwer nachzuweisen sein.

Metall	Eigenfrequenz beobachtet	Breite des selektiven Gebietes	Eigenfrequenz berechnet
Rb	480	ca. 180	490
K	440	ca. 250	438
K+Na	390	ca. 290	—
K+Hg	380	—	—
Na	320	—	321
K+Tl	300	—	—
Ba	280	—	280
Li	230(?)	—	226

Ueber die Anfangsgeschwindigkeit der Elektronen und einen Einfluß der Temperatur auf den selektiven Effekt ist noch nichts Sicheres bekannt.

20. Experimentelles. Zum Nachweis des selektiven Effektes bedient man sich am besten einer lichtelektrischen Zelle der in Figur 9 skizzierten Form, wie sie von Elster und Geitel in ihren grundlegenden Untersuchungen über die Photoströme stark oxydabler Metalle angegeben sind (Füllung mit H_2 von 0,1 mm Hg Druck, etwa 200 Volt beschleunigende Spannung, Galvanometer). Die Oberfläche des Metalles kann kristallinisch fest, flüssig oder pulverförmig sein.

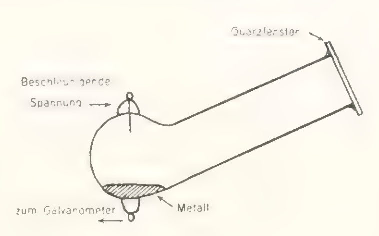


Fig. 9.

Einen Demonstrationsversuch des selektiven Effektes ergibt eine der beschriebenen Zellen mit K-Na-Füllung im polarisierten Licht von etwa 400 $\mu\mu$ Wellenlänge. Bei schräger Incidenz ändert sich der Photostrom mit der Stellung des elektrischen Vektors im Verhältnis etwa 1:100 (Elster und Geitel).

21. Theorie des selektiven Photoeffektes. Der selektive Effekt wurde bald nach seiner Entdeckung als ein Resonanzphänomen erkannt, bei dem die Eigenfrequenz der Elektronen von der Größe der Atome und ihrer Bindung im Molekül abhängt. Es ist F. A. Lindemann (1911) gelungen die Eigenfrequenz der Elektronen unter der Annahme zu berechnen, daß die Elektronen die geladenen Atome (Ionen) an der Oberfläche, d. h. im Abstande des halben Atomdurchmessers nach dem III. Keplerschen Gesetze umkreisen. Er erhält so für die Frequenz ν die Gleichung

$$\nu = 0.114 \sqrt{n\frac{e^2}{m}} \sqrt{\frac{dN}{A}}$$

in der A das Atomgewicht, n die Wertigkeit, d die Dichte und N die Zahl der

Moleküle im Mol bedeutet. Indem Lindemann N = 6.10^{23} (Planck, Regener, Rutherford) setzt und die Beziehung $\lambda = \frac{1}{\nu}$·Lichtgeschwindigkeit benutzt, findet er die in obiger Tabelle als „berechnet" eingetragenen Zahlen, die die experimentell gefundenen überraschend gut wiedergeben.

22. Lichtelektrische Erscheinungen an Nichtmetallen und Flüssigkeiten. Die lichtelektrischen Erscheinungen an nichtmetallischen Oberflächen und Flüssigkeiten sind bisher wenig geklärt. Das bemerkenswerteste Resultat gibt wohl eine Untersuchung von R. Geiger, der auch für die an Isolatoren, im Glas, Hartgummi usw. erzeugten Elektronen das gleiche Verhältnis von Ladung zur Masse erhielt, das Lenard an Metallen gefunden hatte.

23. Beziehungen zur Phosphoreszenz und Fluoreszenz. Von Elster und Geitel sowie Lenard und Saeland ist ein Zusammenhang zwischen lichtelektrischer Elektronenemission und Phosphoreszenz nachgewiesen. Die von Lenard und seinen Mitarbeitern systematisch dargestellten Phosphore, d. h. feste Lösungen von Metallen in Erdalkalisulfiden unter Zusatz eines indifferenten Füllmittels, emittieren im Vakuum Elektronen, wenn sie solches Licht trifft, das auch die Phosphoreszenz erregt. Da die letztere auf bestimmte Wellenlängengebiete beschränkt ist und Lenard die Zahl der Elektronen einstweilen nicht auf die Einheit der absorbierten Lichtenergie bezogen hat, so ist nicht zu entscheiden, ob man die Erscheinungen einem normalen oder selektiven Photoeffekt zuzuschreiben hat.

Auch zwischen Fluoreszenz und lichtelektrischen Erscheinungen scheint nach Versuchen von Stark, Steubing u. a. ein Zusammenhang zu bestehen. An Benzol, seinen Derivaten u. a. untersuchten Substanzen wurde eine Parallelität zwischen der Intensität des erregten Fluoreszenzlichtes und der Zahl der vom Lichte ausgelösten Elektronen festgestellt, sobald das Licht in solchen Banden absorbiert wurde, die nach längeren Wellen abschattiert sind.

Schließlich liegen Versuche über lichtelektrische Elektronenemission vor an Metallhalogenen (Scholl), Sulfiden, Telluriden (Herrmann, Rhode) und flüssigen Farbstofflösungen. Die Mehrzahl der Resultate sind wenig übersichtlich, da keine spektrale Zerlegung des erregenden Lichtes vorgenommen wurde.

24. Lichtelektrische Erscheinungen an Gasen. Den Photoeffekt an Gasen hat Lenard beobachtet, indem er eine Ionisierung der Gase durch kurzwelliges Licht auffand, also eine Abspaltung von Elektronen vom vorher neutralen Atom. Lenards Versuche sind mehrfach in Zweifel gezogen, man hat einen normalen Photoeffekt am Staub- und Nebelteilchen statt an den Atomen selbst zur Erklärung herangezogen, aber es muß heute als sichergestellt gelten, daß tatsächlich sehr kurzwelliges Licht Gase zu ionisieren, d. h. Elektrizitätsträger beiderlei Vorzeichens zu bilden vermag. Die wirksame Wellenlänge liegt bei Luft z. B. zwischen 190 $\mu\mu$ und 160 $\mu\mu$, bei Wasserstoff zwischen 180 und 140 $\mu\mu$. Doch sind die Erscheinungen einstweilen noch derartig verwickelt durch das gleichzeitige Auftreten von chemischen Reaktionen, Nebelkernen und -tröpfchen, daß die für die Ionisation der Erdatmosphäre durch das ultraviolette Sonnenlicht (Arrhenius, Elster und Geitel) so überaus wichtige Erscheinung erst durch zahlreiche weitere Untersuchungen geklärt werden kann.

Literatur. *Die Literatur des normalen lichtelektrischen Effektes findet sich vollständig bis zum Jahre 1909 bei **R. Ladenburg**, Jahrb. d. Radioaktivität und Elektronik, 1909, Heft 4. — Ebenso bei **Chr. Ries**, Das Licht, Leipzig 1909. — Die Literatur des selektiven Photoeffekts findet sich bei **R. Pohl und P. Pringsheim**, Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, Bd. 12 und ff. — Die Literatur der lichtelektrischen Erscheinungen an Nichtmetallen findet sich in den oben zitierten Arbeiten von **R. Ladenburg** und von **Chr. Ries**. — Die Literatur der lichtelektrischen Erscheinungen von Gasen findet sich gleichfalls bei diesen Autoren und bei **Lenard**, Heidelberger Akademieberichte 1910 ff.*

R. Pohl.

Lichtenberg

Georg Christoph.

Geboren am 1. Juli 1742 in Oberammerstadt bei Darmstadt; gestorben am 24. Februar 1799. Er studierte 1763 in Göttingen und wurde 1775 daselbst Professor. Oeftere Reisen führten ihn nach England. Sein Arbeitsgebiet war die Elektrizität. Weithin bekannt wurde Lichtenberg vor allem durch seine satirischen Schriften, in denen er sich als Gegner der sentimentalen Phantastik der damaligen Zeit und des Mystizismus erwies. In Gemeinschaft mit Forster gab Lichtenberg das Göttingische Magazin der Literatur und Wissenschaft heraus.

Literatur. ***Lauchert***, *Lichtenbergs schriftstellerische Tätigkeit, Göttingen 1893. — **R. M. Meyer**, Jonathan Swift und Lichtenberg, zwei Satiriker des 18. Jahrhunderts, Breslau 1886.*

E. Drude.

Lichtenbergische Figuren.

1. Entstehung und Bedeutung. 2. Herstellung und Variation der Lichtenbergischen Figuren: a) Die normalen Lichtenbergischen Figuren; b) Aenderungen an den Lichtenbergischen Figuren bei Variation in der Versuchsanordnung: α) Die Unterlage des Isolators. β) Der Isolator. γ) Pulver und Bestäubung. δ) Das den Isolator umgebende Medium. ε) Art der Zuleitung. ζ) Die Menge der Elektrizität. η) Die Art der elektrischen Entladung. 3. Erklärungsversuche.

1. Entstehung und Bedeutung. Läßt man eine elektrische Entladung auf einen Nichtleiter übergehen, so ist die Wirkung dieser Entladung sofort oder auch einige Zeit später dadurch nachweisbar, daß sich beim Bestäuben der Entladungseintrittsstelle mit einem feinen Pulver eigentümliche Staubfiguren ausbilden. Dabei scheint sich ein prinzipieller Unterschied bemerkbar zu machen zwischen den Figuren, die bei der Entladung von positiver und von negativer Elektrizität entstehen, ein Unterschied, der zunächst einen Einblick in das Wesen der beiden Elektrizitätsarten zu gestatten versprach.

Der Unterschied ist schon von dem Entdecker, Lichtenberg, erkannt worden (Lichtenberg Super nova methodo motum et naturam fluidi electrici investigandi. Nov. Comment. Götting. **8** Phys. p. 168 1777; Comment. Götting. **1** Math. p. 65 1778). Jener Umstand, die interessanten Einzelheiten der Figuren, die Variationsmöglichkeiten in ihrem Aussehen haben eine außerordentlich reiche Literatur über diese Erscheinung seit ihrer Entdeckung gezeitigt. Trotzdem ist man noch nicht zu einer alle Einzelheiten durchaus befriedigenden Erklärung gekommen.

2. Herstellung und Variation der Lichtenbergischen Figuren. 2a. Die normalen Lichtenbergischen Figuren. Man läßt von dem Knopf einer Leydener Flasche, oder auch von dem einen Pol eines Induktoriums Elektrizität auf eine Harzfläche strömen. Es kann zu diesem Zwecke der Elektrophorkuchen oder irgendeine Ebonitplatte von etwa 1 mm Dicke genommen werden. Die Platte kann auf einen Blechstreifen gelegt sein, der normalerweise einfach auf dem Tisch aufliegt oder zur Erde abgeleitet wird. Auch eine Fläche von schwarzem Pech, in dünner Schicht auf eine Metallplatte aufgeschmolzen, ist ein geeignetes Dielektrikum für diesen Zweck.

Bepulvert man mit einem Gemisch von Schwefel und Mennige, das aus einem mit Gaze überspannten Glase fällt, so zeigt sich für die positiv und negativ elektrisierten Stellen ein Farbenunterschied, da jene durch den Schwefel (gelb), diese durch Mennige (rot) abgezeichnet werden. Der wesentliche Unterschied in den beiden Figuren liegt jedoch in ihrer Form, so daß auch das Bestreuen mit einem einfachen Pulver, etwa mit Bärlappsamen, zu entscheiden gestattet, welcher Art die Entladung war. War die Leydener Flasche positiv geladen, so bildet sich um die Eintrittsstelle der Entladung eine strahlige Figur (vgl. Fig. 1, 3 und 4).

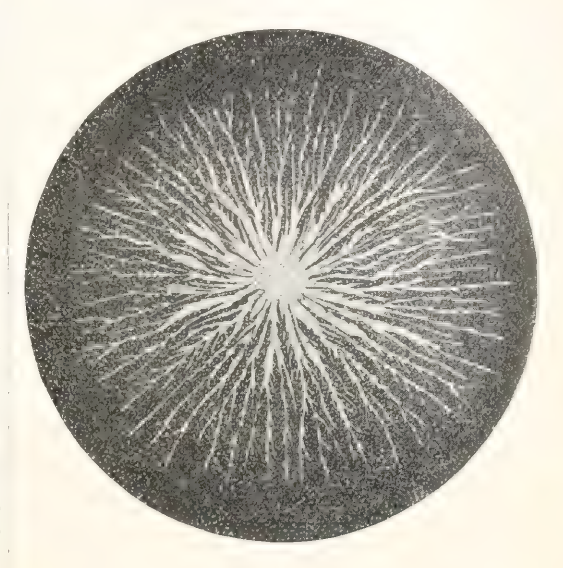


Fig. 1.

Die Strahlen verästeln sich nach außen. Die Strahlenfigur ist umgeben von einer dunklen Zone, diese von einer wolkigen Umhüllung. Beim Bepulvern mit Schwefel-Mennige zeigen sich die die einzelnen Strahlen einfassenden dunklen Stellen von roten Bändern begrenzt. Es folgt demnach auf die positive Mitte der Figur eine neutrale Zone und auf diese wieder eine negative.

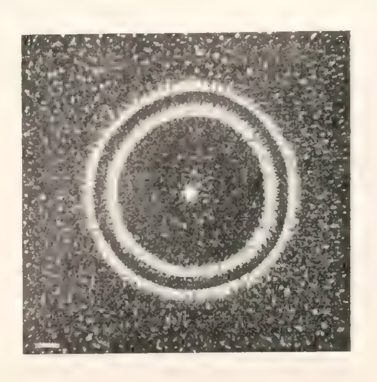


Fig. 2.

Ist die Leydener Flasche negativ geladen gewesen, so zeigt sich eine durchaus andere Figur (vgl. Fig. 2). Eine strahlenlose Scheibe, beim Bestäuben mit Schwefel-Mennige von roter Farbe, oft umgeben von einem dunklen Raume, der von einem gelben strahligen Kranze eingefaßt sein kann. Das charakteristische Merkmal ist hier die ringförmige Scheibe.

Man kann also bei den normalen Lichtenbergischen Figuren die positive Strahlenfigur und die negative Ringfigur unterscheiden.

2b. Aenderungen an den Lichtenbergischen Figuren bei Variationen in der Versuchsanordnung. Das Aussehen der Lichtenbergischen Figuren kann sich soweit ändern, daß gewissermaßen eine Charakterumkehr eintritt, jedenfalls soweit, daß die negative Figur charakteristische Formen der positiven Figur übernimmt und die positive Figur charakteristische Merkmale der negativen. Zwischen diesen Extremen sind eine große Zahl von Abweichungen von der Normalform beobachtet, verursacht anscheinend durch Variationen in den Versuchsanordnungen. Da man, wie oben bemerkt, zu einer in allen Punkten befriedigenden Erklärung des Wesens der Lichtenbergischen Figuren noch nicht gekommen ist, so wird es nötig sein, die Aenderungen zu besprechen, die bei einer Variation der Versuchsbedingungen in den Figuren vor sich gehen; denn diese Aenderungen haben zu den im Abschnitt C zu besprechenden Hypothesen geführt.

Variationen sind möglich α) in der Unterlage des Isolators, β) im Isolator selber, γ) im Pulver und in der Bestäubung, δ) in dem den Isolator umgebenden Medium, ε) in der Art der Zuleitung der Elektrizität, ζ) in der Menge der zugeleiteten Elektrizität, η) in der Art der elektrischen Entladung.

α) Die Unterlage des Isolators. Die Figuren sind herstellbar, sowohl wenn die Unterseite der Ebonitplatte mit Metall belegt und zur Erde abgeleitet, als auch wenn die Platte isoliert ist. Bestäubt man die Platten, bevor man die Entladung übergehen läßt, so kann man bei belegten und unbelegten Platten Figuren erhalten, die sich etwa wie ein photographisches Positiv und Negativ verhalten. Entfernt man nämlich bei der unbelegten Platte nach der Entladung den überflüssigen Staub durch Aufstoßen auf den Tisch, so erhält man eine Figur, in der bestäubte und unbestäubte Partien gegenüber der belegten Platte vertauscht erscheinen, gestaltet wie die Figuren einer Platte, die nach der Entladung bestäubt ist. (Gedacht ist hier, daß nur mit einem einzelnen Pulver, etwa Bärlappsamen bestreut ist.) Figuren 3 und 4 sind Beispiele von positiven Figuren, Figur 3 bei mit Stanniol belegter, Figur 4 bei unbelegter Platte.

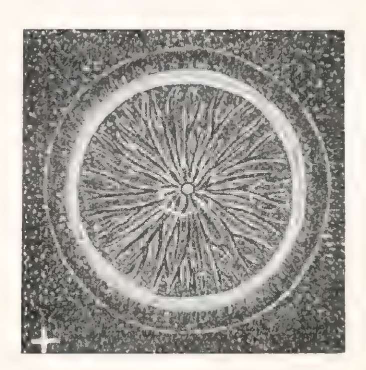


Fig. 3.

Die Größe der abgeleiteten Belegung hat keinen Einfluß auf die Figuren, solange diese kleiner sind als die Belegung. Ist die Belegung hingegen isoliert, so wachsen die Figuren bei wachsender Ausdehnung der Belegung. Es kann sich dann die der übergeführten gleichnamige Elektrizität weiter von der Eintrittstelle auf der isolierten Platte entfernen.

Legt man die Ebonitplatte auf eine reine Holzplatte oder versucht man die Figuren direkt auf poliertem Holz zu erhalten, so ergeben sich bei alten wie bei frischen Hölzern ovale Figuren mit dem großen Durchmesser senkrecht zur Faserrichtung des Holzes.

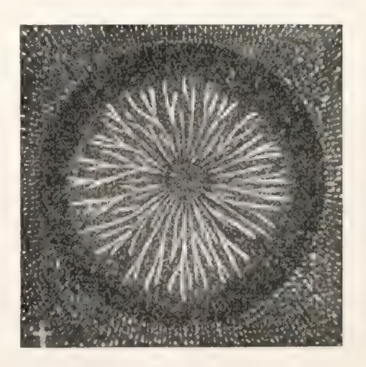


Fig. 4.

Daß es hierbei lediglich auf Unterschiede in der Leitfähigkeit des Holzes in der Faserrichtung und senkrecht dazu ankommt, zeigt sich auch daran, daß man entsprechende Figuren erhält, wenn man die Unterseite der Ebonitplatte mit Stanniolstreifen versieht. Die elektrische Spitze des Zuleiters übt eine Influenzwirkung auf die Metallstreifen aus; die Figuren strecken sich in

der Richtung senkrecht zu den Streifen. Bei genügender Länge der Metallstreifen verringert sich deshalb die Wirkung, bei guter Ableitung der Streifen ist sie aufgehoben.

β) Der Isolator. Die Lichtenbergischen Figuren lassen sich auf festen, flüssigen und luftförmigen Körpern erzeugen. Ebonitplatten, Glasplatten, Kuchen von Siegellack bis zu 5 mm Dicke werden gewöhnlich verwandt. Auch auf Gelatineschichten und daher auf photographischen Platten erhält man gute Lichtenbergische Figuren. Besonders reine Figuren, die nicht aus positiven und negativen gemischt sind, zeigt Antolik auf Glaskolben von 2 l Inhalt, die mit 60° warmem Wasser gefüllt und auf einem hohen Glaszylinder als isolierender Stütze aufgestellt waren. Die positive und negative Figur 5 erhielt Antolik auf großen, mit Stanniol belegten Glasplatten, auf denen 2 Zuleitungsspitzen in genügender Entfernung aufgestellt waren. Zu beachten ist die feine Verästelung bei der positiven Figur, das Entstehen wenig gegliederter feigenblattähnlicher Gebilde bei der negativen Figur.



a



b

Fig. 5.

Auf der Oberfläche von Crookesschen Röhren (Villari), in Röntgenröhren (Riecke) sind Figuren beobachtet worden, die an die Lichtenbergischen Figuren erinnern.

Schmelzbare Isolatoren, isolierende Kittschichten (Holtz), isolierende Flüssigkeiten, zähflüssige Leiter, Petroleum, Olivenöl, venetianisches Terpentin sind geeignet für die Darstellung. Es zeigen sich hierbei, beim Aufströmen der Elektrizität von einem gespitzten Metallstab aus Eindrücke genau von der Form der Lichtenbergischen Figuren, die je nach der Zähigkeit der Flüssigkeit mehr oder weniger schnell verschwinden. Bei Harzflächen kann man die durch das Aufströmen der Elektrizität bedingten Veränderungen unter Umständen noch nach Wochen sehen, wenn man die Fläche zum Schmelzen bringt, wobei sich dann entsprechende rillenförmige Figuren ausbilden.

In Rauchschichten über einem Tisch lassen sich bei geeigneter Versuchsanordnung vom Mittelpunkt ausgehende rundliche, 1 bis 2 qcm große Wölkchen beobachten, die in konzentrischen Kreisen geordnet und vielfach radial durchbrochen sind. Die Erscheinung verschwindet rasch.

Von besonderem Interessse sind natürlich auch Figuren auf nicht isotropen Flächen. Es müssen sich da Entladungen nach den Richtungen weiter ausbreiten, nach denen die dielektrische Polarisation des Mediums stärker ist. Auf die ovalen Figuren auf Holz mit einem Achsenverhältnis von 5:6 ist oben bereits aufmerksam gemacht. Gypsflächen, allgemein Kristallflächen zeigen tatsächlich elliptische Figuren.

γ) Pulver und Bestäubung. Das Bestäubungspulver wird beim Reiben an der Gaze oder beim Reiben der einzelnen Bestandteile aneinander elektrisch; bei Mennige und Schwefel als Gemisch wird Mennige positiv, Schwefel negativ. Doch ist der elektrische Zustand dieser Staubpartikel ohne sonderlichen Einfluß auf die Ausgestaltung der Figuren. Man kann nämlich die Figuren auf einer Ebonitplatte auch noch einen Tag nach der elektrischen Entladung erzeugen, ohne daß ein wesentlicher Unterschied entsteht.

Es sind neben Bärlappsamen die verschiedensten Pulvergemische vorgeschlagen worden, die aber sämtlich das charakteristische Aussehen der Figuren, ihre Form, in gleicher Weise nachbilden, nur die Farbenunterschiede schärfer hervortreten lassen. Als Pulvergemische werden genannt: Zinnober und Ultramarin, Schweinfurter Grün und Mennige, Mennige und Schwefelantimon, Ultramarin und Schwefel; auch ein Dreipulvergemisch wird als praktisch genannt: 1 Volumteil Karmin, 3 Volumteile Lykopodium und 5 Volumteile Schwefelblumen.

Die Bestäubung der Platte kann sowohl vor als auch nach der elektrischen Entladung erfolgen. Auf den Unterschied der dabei entstehenden Figuren ist bereits oben (s. S. 282) aufmerksam gemacht.

δ) Das den Isolator umgebende Medium. Eine Abhängigkeit der Lichtenbergischen Figuren von dem den Isolator um-

gebenden Medium ist zu konstatieren nach 2 Richtungen: a) von dem Druck des betreffenden Mediums, b) von seiner Art.

a) Abhängigkeit vom Druck. Auf dieses Moment hat bereits der Entdecker, Lichtenberg, hingewiesen. Bei normalem Luftdruck ist allgemein die positive Figur größer als die negative. Gestattet die Versuchsanordnung bei einem einzelnen Versuch eine gleichzeitige ungehinderte Erzeugung und Ausbreitung der positiven und negativen Figur, so kann man (nach Rieß) als Verhältnis der Durchmesser erhalten:

$$d_- : d_+ = 1 : 2{,}15,$$

wenn die Leydener Flasche negativ geladen war, und

$$d_- : d_+ = 1 : 3{,}34,$$

wenn sie positiv geladen war.

Sowohl die Größe der Figuren, als auch das Verhältnis der positiven zur negativen Figur ändert sich bei Aenderung des Luftdrucks. Bei abnehmendem Luftdruck steigt die Größe der Figuren, und zwar verhalten sich (nach Reitlinger) die Radien umgekehrt wie die Drucke. Die charakteristischen Unterschiede der positiven und negativen Figur verschwinden immer mehr mit zunehmender Luftverdünnung: die positive Figur nähert sich im Aussehen dem der negativen bei normalem Luftdruck.

b) Abhängigkeit von der Art des Mediums. In verschiedenen Gasen bleiben die charakteristischen Formen der Figuren erhalten. Doch verhalten sich in Luft, Kohlensäure, Wasserstoff, Sauerstoff die Durchmesser der Figuren wie die Schlagweiten der Elektrizität in diesen Gasen und wie die Größe der aus den Spitzen ausstrahlenden Lichtbüschel.

Ersetzt man die Gase durch irgendein anderes Medium, so zeigen die Figuren (nach Mach und Doubrava) nur Größenunterschiede; die negative ist kleiner, beide sind verästelt. Doch können sich die Verhältnisse auch umkehren: unter Olivenöl z. B. erscheinen (nach Mach) die Figuren auf einer mit Magnesia von brennendem Magnesiumdraht beschlagenen Platte sehr klein, aber die negative ist größer als die positive; außerdem ist die negative schwach verzweigt, während die positive einen ziemlich runden Fleck bildet.

Aehnlich wie bei elektrischen Lichterscheinungen im Dunkeln sich für die negative Elektrizität eine fast unbehinderte Ausbreitung zeigt, wenn man etwa einen kleinen Hartgummischirm in den Weg stellt, während bei positiven Entladungen die Lichterscheinungen durch die Vorderfläche der isolierenden Platte begrenzt ist, so zeichnet sich auch auf den Lichtenbergischen Figuren die Wirkung eines solchen Hindernisses in entsprechender Weise ab.

ε) Art der Zuleitung. Von bestimmender Bedeutung für das Aussehen der Figur und damit auch wieder für den Verlust charakteristischer Merkmale und für die Annäherung an die entgegengesetzte Figur ist die Art der Zuleitung der Elektrizität. Man läßt die Elektrizität entweder von dem Knopf der Leydener Flasche direkt übergehen oder aber unter Zwischenschaltung eines irgendwie gestalteten Zuleiters.

a) Entfernung und Form des Zuleiters. Läuft der Zuleiter in einer Spitze aus, so kann bei Nahestellung der Spitze an die Platte beim Ausströmen negativer Elektrizität in der Mitte der Figur ein staubfreier strahliger Stern mit an den Spitzen angeschwollenen Aesten entstehen, bei positiver Elektrizität ein staubfreies Scheibchen mit einem Fleck in der Mitte. Leitet man hingegen die Nadel vor dem Bestäuben mehrere Male ab, so entstehen in beiden Fällen mehrere konzentrische Kreise.

Entfernt man die positiv geladene Spitze weiter von der Platte, so scheint sich die Figur aus vielen kleinen Sternchen zusammenzusetzen. Zum selben Resultate kommt man, wenn die Spitze durch eine Platte ersetzt wird (Fig. 6).



Fig. 6.

Der Grund zu dieser Erscheinung scheint in beiden Fällen im Prinzip derselbe zu sein, einmal das Auftreffen der Aeste eines Büschels, dann das Austreten aus mehreren Punkten einer Scheibe. Ebenso ist es möglich, daß bei größerem Abstand der Spitze mehrere Kreise entstehen. Setzt man die Spitze eines Holzstabes ganz auf, so kann man (nach Holtz) ein allmähliches Wachsen der Figuren beobachten, wobei man den Anschein gewinnt, daß die stetige Entladung intermettierend mit der disruptiven abwechselt. Selbst zu linearen Figuren wie Figur 7 kann man



Fig. 7.

bei geeigneter Form und Stellung des Zuleiters kommen. Die Spitze einer sehr schlanken Elektrode stand hierbei 1½ cm über dem Kreuz in der Figur. Bei einer Neigung der Elektrode nach links hin unter einem Winkel von 45° zur Platte entstand (bei Holtz) die gerade Staublinie, bei weniger schräger Stellung eine gekrümmte Staublinie wie die gestrichelte Linie.

Die Elektrizitätszuleitung kann auch auf einen Stanniolring erfolgen, der auf die Platte aufgeklebt ist, während der andere Zuleiter von unten her auf der Unterseite der Platte in die Mitte des Ringes eintritt. Es erscheinen positive Strahlen- und negative Ringfiguren, oder ein positiver Reif und ein negativer Fleck, je nachdem der Stanniolring negativ oder positiv elektrisiert wurde.

b) Leitungsfähigkeit des Zuleiters oder der Leitungsbahn. Schaltet man in die Leitungsbahn Widerstände ein, so kann bei wachsendem Widerstand die positive Strahlenfigur im Innern eine negative Figur erhalten oder umgekehrt. Bei noch größeren Widerständen erscheint wieder die einfache Figur, aber verzerrt. Verwendet man als Zuleiter einen Holzstab, so kann (nach Holtz) die positive Figur direkt gleich der negativen werden. Bei zu starker Ladung treten freilich wieder Verzweigungen auf. Wie ein Metallstab verhalten sich andere gute Leiter, auch wasserhaltige Salze und Lösungen in Kapillarröhren; wie der Holzstab verhalten sich Papier, Hanf, Watte, Wolle, Gyps usw.

Der Holzstab mit Bronzepulver bedeckt gibt eine Strahlenfigur, rein gibt er nur Scheibenfiguren. Bei Anwendung von glühenden Oesen als Zuleiter werden (nach Wesendonck) die Figuren größer.

c) Die Schnelligkeit des Zuströmens ist für zweierlei von Bedeutung: Erstens für die regelmäßige Ausbildung der Figuren, sofern z. B. die Strahlen der positiven Figur bei schneller Entladung gerade und gleichlang werden; bei langsamer Entladung krümmen sie sich. Zweitens kann bei sehr langsamem Zuströmen die positive Figur direkt die Gestalt der negativen annehmen.

d) Zuleitung in mehreren Spitzen. Setzt man 2 Spitzen mit gleicher Ladung auf, und zwar so nahe, daß die Figurengebiete ineinander greifen, so grenzen sich die positiven Figuren mit einer auf der Verbindungslinie der Eintrittspunkte senkrecht stehenden dunklen Trennungslinie gegeneinander ab. In der Richtung dieser Linie sind die Figuren stärker ausgedehnt als in der Verbindungslinie. Bei der negativen Figur ist eine geringere Veränderung der Radien zu beobachten. Werden die Figuren nacheinander hergestellt, so biegt die eine um die andere um. Die gegenteilige Erscheinung einer Verlängerung der Figuren in der Verbindungslinie der Zuleitungen tritt bei entgegengesetzter Ladung der beiden Spitzen ein. In Figur 5 können die beiden benachbarten Arme beider Figuren einander umklammern. Findet ein Ausgleich durch eine Funkenbahn statt, so gehen die beiden Arme direkt ineinander über. Bei oszillierenden Entladungen tritt die eine Figur innerhalb der anderen auf; beide Figuren haben einen gemeinsamen Mittelpunkt.

ζ) Die Menge der Elektrizität. Läßt man einer Entladung sofort eine zweite folgen, so werden die Ränder der einzelnen Strahlen verästelter. Läßt man längere Zeit verstreichen zwischen den einzelnen Entladungen, so schieben sich neue Aeste zwischen die alten. Im zweiten Fall muß sich wohl die Entladung einen neuen Weg bahnen, während sie im ersten Falle noch in der erhitzten Luftbahn der ersten Entladung zu verlaufen vermag.

Geht die zweite Entladung in denselben Punkt wie die erste, so bleibt die Figur symmetrisch; geht sie mehr nach dem Rand hin, so streckt sich bei gleichnamiger Elektrizität die zweite Figur mehr nach dem Rand hin, bei ungleichnamiger mehr nach der Mitte hin.

η) Die Art der elektrischen Entladung. Die Einwirkung einer oscillierenden Entladung auf die Form der Figuren ist oben bereits angedeutet. Man kann eine negative Zweigfigur erhalten durch Unterdrückung der Glimmentladung und damit durch Begünstigung der Büschelentladung. Das gelingt anscheinend am einfachsten durch möglichst dichte Bestäubung (anscheinend wirkt eine Gelatineschicht einer photographischen Platte ganz ähnlich). Die Zweige der so erhaltenen negativen Zweigfigur sind dicker und krummer als die der positiven, mit Haaren besetzt und mit besenartigen Enden versehen.

Auch das Zustandekommen von mehrfachen Ringen ist aus der Art der Entladung zu erklären. Vor allem entstehen die Ringe nicht auf einmal; die äußeren entstehen später als die inneren. Es handelt sich hier um Partialentladungen, wie sie bei jeder verzögerten Entladung resultieren. Jedem Ring entspricht dann eine partielle Entladung. Es ist denkbar, daß auch die Zweigfigur in einzelnen Akten fertiggestellt wird. Jede positive Entladung kann mit Glimmlicht beginnen und mit Büschellicht abschließen. Bei negativer Entladung sind es gewöhnlich nur Glimmentladungen.

In schöner Weise kann man nach W. König bei oszillatorischen Entladungen das Auftreten der beiden Arten von Lichtenbergischen Figuren zeigen, wenn man die Platte während der Entladung rotieren läßt. Es ergibt sich dadurch beim Bestäuben eine Kette von abwechselnd positiven und negativen Figuren.

Von Bedeutung für das Gebiet der elektrischen Schwingungen wurden folgende Beobachtungen von v. Bezold: Bei einer Zweiteilung (ebenso bei Dreiteilung) des Zuleitungsdrahtes und Variation der Länge der beiden Aeste wächst z. B. die eine Figur A, wenn ihr Zuleitungsdraht Z_a verlängert wird, während die andere Figur B sich verkleinert. Bei sehr großer Länge von Z_a beginnt dann auch Figur B zu wachsen. Zur Erklärung dieser und weiterer Tatsachen nimmt dann v. Bezold an, daß es sich hier um eine Reflexion der in Draht B eintretenden Elek-

trizität am Ende des Drahtes handle, wobei dann Interferenz der reflektierten und ankommenden Wellen eintrete. Die Stellen des Drahtes, an denen Maximal- und Minimalfiguren erscheinen, seien dann den Schwingungsbäuchen und -knoten zu vergleichen. Auch das abwechselnde Auftreten von positiven oder negativen Figuren bei einer Variation der Längen der von zwei Seiten her an eine Platte tretenden verschieden langen Zuleitungen, zumal bei einem Polwechsel, wird schon von v. Bezold in entsprechender Weise gedeutet.

3. Erklärungsversuche. Wir sind mit den letzten Betrachtungen schon an Versuche zu einer Erklärung der komplizierten Erscheinung der Lichtenbergischen Figuren herangetreten. Zu einer durchaus befriedigenden Erklärung ist man, wie oben gleich bemerkt wurde, nicht gekommen, wenigstens nicht zu einer alle beobachteten Einzelheiten zwanglos erklärenden Hypothese. Man hat wohl in den Lichtenbergischen Figuren eine Folge der ungleichen Ausbreitung der positiven und negativen Elektrizität in Nichtleitern zu suchen, wobei die Versuchsbedingungen, in diesem Falle die Möglichkeiten für das Ausströmen und Einströmen der beiden Elektrizitätsarten so variiert werden können, daß die beiden charakteristischen Grundformen sich verändern. Es kann dann schließlich selbst ein Uebergang der einen Figur zur anderen sich zu vollziehen scheinen.

Daß die Lichtenbergischen Figuren ihre Entstehung disruptiven Entladungen verdanken, ist schon von Rieß erkannt. Doch läßt sich die Rießsche Ansicht, daß der verschiedene Charakter der beiden Grundfiguren auf sekundäre, die disruptive Entladung begleitende Umstände zurückzuführen sei, kaum aufrechthalten. Rieß meint, jeder Nichtleiter sei mit kondensierten Wasserdämpfen bedeckt; durch die ersten Teile der diskontinuierlichen Entladungen sollen diese Wasserdämpfe losgelöst und über die Platte hingeführt werden, wobei diese negativ elektrisch wird. Die verschiedene Größe der Figuren ließe sich dadurch wohl erklären, auch das allmähliche Verschwinden der Unterschiede bei wachsender Luftverdünnung wegen des allmählichen Verschwindens der Feuchtigkeitsschicht. Doch läßt sich gegen diese Ansicht vor allem anführen, daß der Versuch ebenso gut oder besser mit vorher erhitzten Platten geht, und daß man bei vorher entgegengesetzt elektrisierten Flächen auch zu Resultaten kommt.

Zu einer anderen Hypothese kommt v. Bezold durch die Analogie zwischen der Ausbreitung von Gasentladungen einerseits und der von strömenden Flüssigkeiten andererseits.

Es lassen sich auf und mit diesen Flüssigkeiten Figuren erzeugen beim Ansaugen oder Wegblasen, die an die Lichtenbergischen Figuren erinnern. Man müßte dann bei der positiven Entladung eine Bewegung von Teilchen gegen den Zuleiter hin, bei der negativen eine solche von dem Zuleiter weg annehmen. Dagegen ist zu bemerken (nach Holtz), da man dann der Lage der Sache nach an elektrisierte Luft denken müßte, daß bei elektrisierten Spitzen immer eine Luftbewegung von der Spitze weggeht. Auch ist es sehr unwahrscheinlich, daß mechanisch oder elektrisch fortgeschleuderte Luft krummlinige oder verästelte Wege beschreibt.

Nach Reitlinger und Wächter kann man auch annehmen, daß die negativen Figuren durch fortgeschleuderte Luft, die positiven nur durch von der Elektrode abgerissene feste Partikelchen entstehen.

Holtz versucht diese Partikel abzufangen und erhält die Figuren trotzdem. Weiter ist es unwahrscheinlich, daß kleinste, nur mikroskopisch sichtbare Teilchen, denn um solche müßte es sich bei den losgerissenen und geschleuderten Partikeln handeln, die bei vorheriger Bestäubung der Platten vorhandenen viel größeren Massen bewegen. Außerdem dürften auch hier die geschleuderten Teilchen nur gerade und radial gerichtete Wege beschreiben.

Schon vor der Entstehung der Lichtenbergischen Figuren zeigen sich kongruente Leuchtfiguren, die sich auf einer photographischen Platte fixieren lassen. Die Lichterscheinungen, die bei allen Stoffen gleich sind, können auch wie die Lichtenbergischen Figuren ihren Charakter umkehren. Man kommt also zu einer ungezwungeneren Erklärung durch Annahme einer verschiedenen Ausbreitung der beiden Elektrizitäten, wobei noch die elektrische Polarisation der schlecht leitenden Platte und die Influenz auf eine ableitende Unterlage in Betracht zu ziehen sind. Die verschiedene Größe der Figuren erklärt sich dann aus dem verschiedenen zur positiven oder negativen Entladung nötigen Potential und dem daraus resultierenden Antrieb. Daß es sich dabei auch um eine rein mechanische Fortführung handelt, ist nicht ganz unwahrscheinlich, da in sehr verdünnter Luft die charakteristischen Formen sich verlieren.

Holtz kommt zu dem Schluß, daß die Luft in der ganzen Erscheinung überhaupt eine Nebenrolle spiele, und daß es hier nur auf die Ausbildung der Funkenentladung, Glimmentladung, Büschelentladung ankommt. Die Entladungen elektrisieren die Platte. Hat man diese vorher bestäubt, so wird das ebenfalls elektrisierte Pulver von den stärker elektrisierten Stellen fortgeworfen; bei Nachbestäubung wird es von ihnen angezogen. Dabei wird die Platte durch Glimmentladung gleichmäßiger elektrisiert; die Büschelentladung bevorzugt einzelne Linien. Unterdrückt man bei positiver Elektrizität den Büschel, so erhält man auch hier Ringe. Erzwingt man bei negativer Entladung den Büschel, so entsteht auch hier eine Zweigfigur.

Ist so der Unterschied der beiden Fi-

guren zwanglos im wesentlichen in der Entladungsform zu finden, so ist doch festzuhalten, daß auch von dieser Erklärung aus noch manche im zweiten Abschnitt beschriebenen Einzelheiten, wie etwa die Ausbildung linearer Figuren, nicht ohne weiteres verständlich sind.

Literatur. *Eingehende Literaturangaben bis 1885 in* ***G. Wiedemann****, Die Lehre von der Elektrizität 3. Aufl. IV. Bd. S. 780 bis 798 2. Abt. 1885. — Weiter in* ***Winkelmann****, Handbuch der Physik IV. Bd. S. 48. — Eine literarische Uebersicht über alle möglichen elektrischen Figuren stellte* ***Oberbeck*** *zusammen, Programmarbeit d. Herz. Karls-Realgymnasiums zu Bernburg, Ostern 1894. — Eine übersichtliche Darstellung einer ausgewählten Literatur bis 1905 findet sich bei* ***W. Holtz****, Ueber die Lichtenbergischen Figuren und ihre Entstehung. Phys. Zeitschr.* ***6*** *319 1905. — Zu verwandten Gebieten führen die Arbeiten von* ***M. Toepler****, Ann. d. Phys.* ***21*** *193 1906; Phys. Zeitschr.* ***8*** *743 bis 748 1907;* ***8*** *919 bis 923 1907. — Ferner* ***A. W. Porter****, Elektrische Entladungen über photographische Platten. Nature* ***83*** *142 1910; Rep. Brit. Assoc. 1909 S. 404.*

K. Kurz.

Lichtenstein

Martin Heinrich Karl.

Geboren am 10. Januar 1780 in Hamburg; gestorben am 3. September 1857 auf einer Reise zwischen Corsör und Kiel. Studierte Medizin in Jena und Helmstedt und begleitete dann als Hausarzt den Gouverneur der Kapkolonieen, General Janssens. Von 1804 bis 1806, der Zeit seines Aufenthalts am Kap, widmete er sich vorzüglicherweise der Zoologie und unternahm viele naturwissenschaftliche Reisen, die ihm reiche Ausbeute brachten. Nach der Eroberung der Kapkolonieen durch die Engländer kehrte er nach Deutschland zurück, wo er sein naturwissenschaftlich wichtiges Werk Reisen im südlichen Afrika 2 Bde. 1810/11 verfaßte. Nach Errichtung der neuen Berliner Universität begann Lichtenstein dort Vorlesungen über Naturgeschichte zu halten und wurde 1811 Professor der Zoologie. Auf seine Anregung bei Wilhelm v. Humboldt und nach seinem Plan ward 1810 das Zoologische Museum an der Universität gegründet, dessen Direktion Lichtenstein 1813 übernahm. Er hat es bis zu seinem Tode geleitet und seiner jetzigen hohen wissenschaftlichen Bedeutung zugeführt.

Literatur. *Allgem. Deutsche Biographie 1883. —* ***Ratzeburg****, Forstwissenschaftl. Schriftsteller-Lexikon.*

W. Harms.

Lichtfortpflanzung

in bewegten Medien.

1. Die Lichtfortpflanzung in Körpern, die relativ zur Lichtquelle bewegt sind: a) Einfluß auf die Strahlrichtung: Aberration. b) Einfluß auf die Geschwindigkeit: Die Mitführung des Lichtes. c) Einfluß auf die Frequenz (Farbe): Die Dopplersche Erscheinung. 2. Der Einfluß einer gemeinsamen Bewegung von Lichtquelle und durchstrahlter Substanz auf die Lichtfortpflanzung: a) Einflüsse „erster Ordnung". b) Einflüsse „zweiter Ordnung". 3. Zusammenhang mit der Elektrodynamik bewegter Medien: a) Die Theorie von Hertz. b) Die ursprüngliche Elektronentheorie von Lorentz und die Elektrodynamik von Cohn. c) Das Relativitätsprinzip von Einstein und die Elektrodynamik von Minkowski.

Bis in die neueste Zeit hinein hat man die Lichtfortpflanzung durch den leeren Weltenraum, das Vakuum, nur mit Hilfe einer gedachten, idealen Substanz als Träger des Lichtes vermeint verstehen zu können, sei es, daß substantielle Partikel gemäß den Vorstellungen der Newtonschen Emissionstheorie gleich Projektilen von den leuchtenden Körpern ausgeschleudert werden, sei es, daß der Weltäther gemäß der Huygensschen Undulationslehre nach Art eines festen, elastischen Körpers jene Schwingungen in Wellenform überträgt, die wir als Licht empfinden. Wie grundverschieden diese Vorstellungen im einzelnen auch sind, jedenfalls lassen sie erwarten, daß die Lichterscheinungen durch Bewegungen der Lichtquelle, der durchstrahlten Substanzen oder des Beobachters beeinflußt werden müssen. Wie in einem fahrenden Eisenbahnzuge die vertikal fallenden Regentropfen schräge Tropfenbahnen an den Fensterscheiben markieren, oder wie ein Schiff auf bewegter See von den Wellenzügen in schnellerer Folge getroffen wird, wenn es ihnen entgegen als wenn es mit ihnen segelt, so muß das Licht, das die durch das Aethermeer dahineilende Erde von den Gestirnen erreicht, in Strahlrichtung und Schwingungszahl (Farbe) durch die Erdbewegung verändert erscheinen.

Die beobachtbaren Erscheinungen dieser Art, obwohl an Zahl nicht groß, haben auf unsere Vorstellungen von der Lichtübertragung solchen gewaltigen Einfluß ausgeübt, daß sie sich nur im Zusammenhange mit der Entwickelung der Theorie darstellen lassen.

1. Die Lichtfortpflanzung in Körpern, die relativ zur Lichtquelle bewegt sind. 1a) Einfluß auf die Strahlenrichtung: Aberration. Der englische Astronom Bradley stellte im Jahre 1727 eine Untersuchung darüber an, ob ein Fixstern von zwei diametral gelegenen

Punkten der Erdbahn in einer merklich verschiedenen Richtung erscheine. Eine solche „Parallaxe" der Fixsterne fand er nicht (wegen der ungeheuren Entfernung der Fixsterne ist es erst viel später gelungen, sie bei einigen Sternen nachzuweisen), aber er entdeckte dabei eine andere scheinbare jährliche Verschiebung der Gestirne, die Aberration. Jeder Stern beschreibt eine kleine Ellipse, deren große Halbachse die Richtung der Ekliptik und immer dieselbe (Winkel-)Länge α_m hat; die kleine Achse variiert vom Werte 0 in der Ekliptik bis zum Werte α_m im Pol der Ekliptik. Bradley erklärte diese Erscheinung mit Hilfe der damals herrschenden Emissionstheorie des Lichtes folgendermaßen (Fig. 1.)

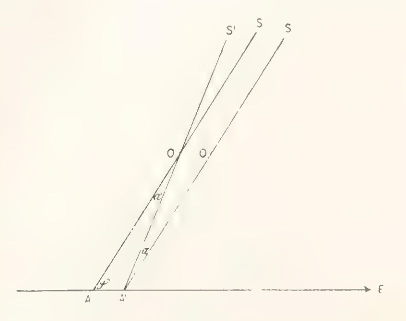


Fig. 1.

AE sei die Richtung der Erdbewegung. In dem Augenblicke, da ein in der Richtung S'O kommendes Lichtpartikel das Objektiv O des Fernrohrs passiert, sei das Auge des Beobachters in A. Während das Partikel das Fernrohr durcheilt, bewegt sich dieses mit der Erde so, daß A nach A', O nach O' rückt; die Richtung OS der Mittellinie AO (oder A'O') des Fernrohrs, der „relative Strahl im Vakuum", bildet also mit der wirklichen Strahlrichtung OS' einen Winkel α. Ist v die Geschwindigkeit der Erde, c die des Lichtes, $\sphericalangle$ SAE $= \varphi$, so ist AA' proportional v, OA' proportional c, also

$$\sin \alpha = \frac{v}{c} \sin \varphi \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \quad 1)$$

Die „Aberration" α hat ihren größten Wert α_m für $\varphi = 90^0$, nämlich

$$\sin \alpha_m = \frac{v}{c} \, . \, . \, . \, . \, . \, . \quad 2)$$

Die Formel 1) erklärt die von Bradley beobachteten jährlichen Verschiebungen der Fixsterne. Nach neueren Messungen ist

$$\alpha_m = 20'',47 \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \quad 3)$$

Mittels der durch astronomische Beobachtungen (Venusdurchgänge usw.) bekannten Entfernung Sonne—Erde (Sonnenparallaxe 8'',8) läßt sich die Geschwindigkeit v der Erde berechnen. Aus Gleichung 2) kann man daher die Lichtgeschwindigkeit c bestimmen; es ergibt sich rund

$$c = 300\,000 \text{ km pro sec.} \, . \, . \, . \, . \quad 4)$$

in Uebereinstimmung mit anderen Messungen.

Um den Einfluß des Mediums auf die Lichtfortpflanzung zu erforschen, hat Airy das Fernrohr mit Wasser gefüllt; er fand den Wert von α_m unverändert. Dieses Verhalten kann die Emissionstheorie erklären, wenn die Annahme gemacht wird, daß die Lichtpartikel in der Bewegungsrichtung nur mit einem Bruchteil u der Geschwindigkeit v des Mediums, nämlich

$$u = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) v \, . \, . \, . \, . \, . \, . \, . \quad 5)$$

fortgeführt werden, wo n den Brechungsindex der Substanz bedeutet (Fig. 2). Fällt

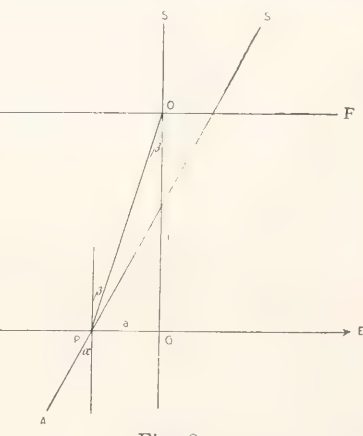


Fig. 2.

z. B. der Lichtstrahl zur Zeit t_0 in der Richtung S'O senkrecht auf die eine, der Erdbewegung parallele Begrenzungsebene OF des Mediums, so wird er zur Zeit t nicht den auf der Geraden S'O gelegenen Punkt Q der anderen Begrenzungsebene QE, sondern einen Punkt P derselben treffen, der im Augenblicke t_0 um a von Q entfernt war, und zwar ist offenbar

$$\frac{v - u}{a} = \frac{c'}{l},$$

wo c' die Lichtgeschwindigkeit im Medium, l die Schichtdicke ist. Der Austrittswinkel α hängt mit dem Winkel POQ $= \beta$ nach dem Brechungsgesetz so zusammen:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{c}{c'} = n;$$

da β klein ist, kann OP $= l$, also $\sin \beta = \frac{a}{l}$ gesetzt werden, und man findet

$$\sin \alpha = \frac{n^2}{c} (v - u).$$

Das wird für den Wert (5) von u und nur für diesen gleich dem Werte $\frac{v}{c}$, der dem Vakuum (n = 1) entsprach (Formel (2)). Der Durchgang des Strahls durch eine Schicht der Materie ändert also die gemäß der elementaren Konstruktion (Fig. 1)) bestimmte Richtung des „relativen Strahls im Vakuum" nicht. Dieser „Mitführungskoeffizient" $1 - \frac{1}{n^2}$ spielt im folgenden eine fundamentale Rolle.

Als durch die Entdeckung der Interferenz- und Beugungserscheinungen die Emissionstheorie der Wellentheorie weichen mußte, erschienen diese Erklärungen nicht mehr befriedigend. Als Strahlrichtung ist in der Wellenlehre die Richtung der Wellennormale aufzufassen. Eine rein geometrische Betrachtung reicht jetzt nicht mehr aus, vielmehr muß berücksichtigt werden, in welcher Weise die Bewegung unserer optischen Apparate die Wellenfront und damit die Abbildung des Sternes beeinflußt. G. G. Stokes (1845) machte die Hypothese, daß der Aether an der Materie haftet und daher von ihr in Bewegung gesetzt wird. Während in großer Entfernung die Aethergeschwindigkeit Null ist, nimmt sie stetig bei der Annäherung an die Materie bis zum Werte v zu, und daraus folgt eine Drehung der Wellenfront, welche der Aberrationsformel 1) entspricht. Nun verlangt aber die Transversalität der Lichtwellen einen inkompressiblen Aether, und das widerspricht infolge bekannter Sätze der Hydrodynamik den Hypothesen von Stokes, nach denen der Aether an der Materie haften und sich rotationslos bewegen sollte.

Diese Schwierigkeit umgeht die schon 1818 von Fresnel formulierte Hypothese. Nach dieser ruht der Aether überall und durchdringt die Materie frei; diese enthält aber „verdichteten Aether", der an ihrer Bewegung teilnimmt. Die Lichtwellen machen die Bewegung des Schwerpunktes von ruhenden und „verdichteten" Aether mit; daraus folgt für sie die durch 5) dargestellte Mitführungsgeschwindigkeit. Wendet man nun eine ähnliche Betrachtung wie die oben für die Emissionstheorie angeführte auf die Wellennormalen als Strahlen an, so ergibt sich wieder das Aberrationsgesetz 1). Eine exaktere Durchführung der Fresnelschen Theorie beruht auf dem Umstande, daß nach derselben die optischen Gesetze für den „relativen Strahlengang" durch die Erdbewegung nicht beeinflußt werden, worauf weiter unten eingegangen werden soll.

1b) Einfluß auf die Lichtgeschwindigkeit: Die Mitführung des Lichtes. Eine direkte experimentelle Prüfung der Fresnelschen Hypothese ist von Fizeau (1851) ausgeführt, später (1886) von Michelson und Morley wiederholt worden (Fig. 3). Das von Q ausgehende Licht wird durch die Blenden B_1, B_2 in zwei Strahlen geteilt, die durch die Linse L_1 parallel gemacht, von der Linse L_2 auf dem Spiegel S konzentriert, und von diesem derart zurückgeworfen werden, daß sie den Weg B_1L_1 SL_2 B_2 in entgegengesetztem Sinne durchlaufen und in A mittels einer halbdurchlässigen Platte zur Interferenz gebracht werden. Auf ihrem Wege passieren sie zwei Röhren, in denen Wasser strömt, der eine Strahl in der Strömungsrichtung, der andere entgegen. Der durch die Verschiebung der Interferenzfransen gemessene Gangunterschied der Strahlen entsprach einer Mitführung gemäß Formel 5.

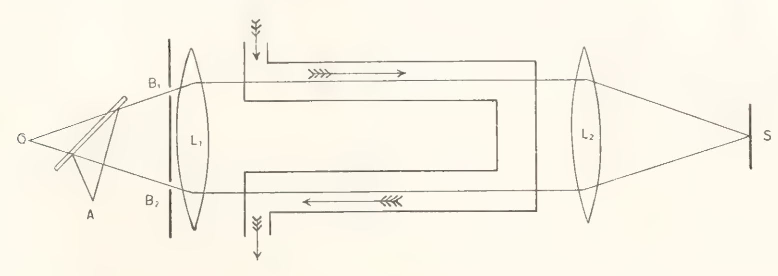


Fig. 3.

1c) Einfluß auf die Frequenz (Farbe): Die Dopplersche Erscheinung. Außer Richtung und Geschwindigkeit des Lichtes wird auch die Schwingungszahl (Farbe) durch Bewegung beeinflußt, und zwar nicht nur durch Bewegung von Lichtquelle oder Beobachter, sondern auch beim Durchgang durch bewegte Körper und bei Reflexion an bewegten Spiegeln. Das Gesetz dieser aus der Akustik wohlbekannten Erscheinung wird als Dopplersches Prinzip auf Grund der Hypothese vom ruhenden Aether so formuliert: Ist v die Geschwindigkeit der Lichtquelle Q gegen den Aether, v′ die des Beob-

achters A, so gilt für das Verhältnis der beobachteten Frequenz ν' zu der ausgesandten ν:

$$\frac{\nu'}{\nu} = \frac{c - v' \cos \varphi'}{c - v \cos \varphi} \quad \ldots \ldots \; 6)$$

wo φ und φ' die Winkel sind, die die Richtungen der Geschwindigkeiten der Lichtquelle Q, und des Beobachters A mit der Verbindungslinie QA bilden (Fig. 4).

Diese Formel, die aussagt, daß bei Annäherung von A und Q die beobachtete Frequenz erhöht, bei Entfernung verringert wird, ergibt sich einfach daraus, daß im ersteren Falle der Beobachter durch eine Bewegung mehr, im zweiten weniger Wellen begegnet.

Wegen Gleichung muß die Annäherungsgeschwindigkeit 3 km pro sec betragen, damit sich ν' von ν um $^1/_{100\,000}$ seines Wertes unterscheidet. Daher hat zuerst die Astronomie die Erscheinung bestätigen können. Infolge ihrer Bewegung in der Visierrichtung liefern viele Fixsterne ein Spektrum, dessen Linien gegen die entsprechenden irdischen ver-

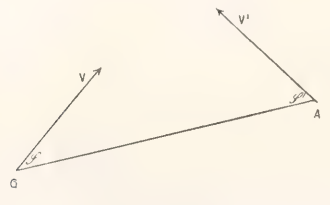


Fig. 4.

schoben sind. Man hat hiermit eine Methode zur Bestimmung von Sterngeschwindigkeiten. Die Richtigkeit dieser Erklärung der Linienverschiebung wurde bestätigt durch die Beobachtung von Doppelsternen, bei denen die Periode des Umlaufs (oder der dadurch hervorgerufenen Helligkeitsschwankungen) mit der Periode der Linienverschiebung zusammenfiel. Die Rotation der Sonne und vieler Planeten ließ sich durch diese Methode bestimmen; ein äquatorial gestellter Spalt liefert S-förmig gebogene Spektrallinien, aus deren Ausbiegung die Rotationsgeschwindigkeit zu berechnen ist. Die Spektra leuchtender Gase und Dämpfe zeigen Linien von endlicher Breite; man erklärt dies durch die Dopplersche Linienverschiebung, die durch die molekularen Bewegungen hervorgerufen wird. Die Aenderung der Linienbreite bei Erhöhung der mittleren Molekülgeschwindigkeit (Temperatur) entspricht dieser Theorie.

Bei der Reflexion des Lichtes an einem bewegten Spiegel wird ebenfalls die Farbe geändert. Bedeuten φ und φ' Einfalls- und Reflexionswinkel, so sind die an einem festen Punkte des Aethers gemessenen Frequenzen ν, ν' von einfallendem und reflektiertem Strahl wieder durch die Beziehung 6 verknüpft, wenn darin v und v' beide gleich der Geschwindigkeit des Spiegels gesetzt werden. Auf Grund dieser Tatsache hat Belopolski (1900) mit Hilfe eines Systems schnell rotierender Spiegel die Dopplersche Erscheinung unter Benutzung irdischer Lichtquellen hervorgebracht. Eine große Rolle spielt die Theorie des bewegten Spiegels (Abraham 1904) in der Lehre von der Wärmestrahlung bei der Ableitung des Stephan-Boltzmannschen Gesetzes (1884) und des Wienschen Verschiebungsgesetzes (1893). Danach hängt die Helligkeit K eines monochromatischen Strahlenbündels bei „schwarzer Strahlung“ folgendermaßen von der Frequenz ν und der Temperatur T ab:

$$K = \frac{\nu^3}{c^2} F\left(\frac{T}{\nu}\right) \quad \ldots \ldots \ldots \; 7)$$

wo F eine universelle Funktion bedeutet. Die experimentelle Bestätigung dieser Gesetze kann als indirekte Prüfung des Dopplerschen Prinzips angesehen werden.

2. Der Einfluß einer gemeinsamen Bewegung von Lichtquelle und durchstrahlter Substanz auf die Lichtfortpflanzung.

2a) Einflüsse „erster Ordnung“. Eine allgemeine Erfahrung lehrt, daß man bei der Untersuchung optischer Vorgänge mit irdischen Lichtquellen nicht Rücksicht darauf zu nehmen braucht, daß das ganze System an der Erdbewegung teilnimmt. Daß in der Tat ein Einfluß derselben nicht vorhanden ist, ist durch zahlreiche Versuche sicher gestellt worden. So ist die Unabhängigkeit der Brechung und Interferenz (Ketteler, Respighi, Hoeck, Mascart) sowie der Strahlungs- und Absorptionserscheinungen (Haga, Smyth, Nordmeyer) von der Orientierung des Apparates gegen die Erdgeschwindigkeit bewiesen worden; ein Experiment Fizeaus, der einen Einfluß der Erdbewegung auf die Drehung der Polarisationsebene beim schiefen Durchgang durch eine Glasplatte festgestellt haben wollte, wird angezweifelt.

Die Fresnelsche Theorie gibt davon Rechenschaft, wenigstens für Vorgänge, bei denen das Quadrat des Verhältnisses $\frac{v}{c}$ der Geschwindigkeit der Erde zu der des Lichtes vernachlässigt werden kann. $\frac{v}{c}$ hat etwa den Wert 0,0001.

Eine Wellenfläche habe (Fig. 5) zur Zeit t

die Lage σ, zur Zeit $t + dt$ die Lage σ'; nach dem Huygensschen Prinzipe ist σ' die Umhüllende von allen Elementarwellen, die von den Punkten P auf σ ausgehen. Hat das Medium eine Geschwindig-

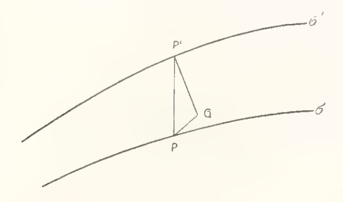


Fig. 5.

keit v gegen den Aether und wird dadurch in der Zeit dt der Punkt P der Lichtwelle nach Q geführt, so ist dieser Punkt Q das Zentrum der elementaren Kugelwelle, die σ' in P' berührt. Nach Fresnel (Formel 5) ist die Geschwindigkeit eines Wellenpunktes P gegen den Aether $u = \left(1 - \frac{1}{n^2}\right) v$, also die gegen die Materie $\frac{1}{n^2} v$; danach ist $PQ = \frac{1}{n^2} v\,dt$. Die Richtung PP' bestimmt den „relativen Strahl" in dem Medium (im Vakuum kommt diese Konstruktion auf die Elementare von Fig. 1 heraus); $c^* = \frac{PP'}{dt}$ ist die „relative Lichtgeschwindigkeit". Aus dem Dreieck PQP' ergibt sich unter Vernachlässigung der Glieder von der Ordnung $\frac{v^2}{c^2}$:

$$\frac{1}{c} = \frac{1}{c'} \left(1 - \frac{v}{c'} \frac{\cos\delta}{n^2}\right) \quad . \; . \; . \; . \quad 8)$$

wo $\delta = \sphericalangle P'PQ$ ist. Konstruiert man nach dieser Regel sukzessive Punkte P, P', P'', . . ., so bestimmen diese den „relativen Strahlengang". Die Verteilung von Helligkeit und Dunkelheit hängt von diesem ab. Denn für die Zeit, die das Licht braucht, um von einem irdischen Punkte A zu einem anderen B zu gelangen, ergibt sich aus 8)

$$\int_A^B \frac{ds}{c^*} = \int_A^B \frac{ds}{c'} - \int_A^B \frac{v \cos\delta}{c'^2 n^2}\, ds. \; . \; . \; 9)$$

Hier hat das zweite Integral rechter Hand wegen $n^2 c'^2 = c^2$ den vom Wege unabhängigen Wert $\frac{1}{c^2}\,pv$, wo p die Projektion der Strecke AB auf die Richtung v ist. Das gilt für eine beliebige räumliche Verteilung des Brechungsindex n; der relative Strahlengang wird also ebenso wie der absolute durch das Prinzip von der kürzesten Lichtzeit bestimmt, so daß die Gesetze der Spiegelung und Brechung der relativen Strahlen für den irdischen Beobachter dieselben sind, wie im Falle der Ruhe. Da ferner die Differenz der Lichtzeiten längs zwei die Punkte AB verbindenden Wegen denselben Wert hat wie im Falle der Ruhe, weil sich das zweite Integral $\frac{1}{c^2}\,pv$ aus der Differenz heraushebt, werden auch die Interferenzerscheinungen durch die Bewegung der Erde nicht geändert. Dasselbe gilt daher von der Gesamtheit der optischen Erscheinungen, da sich alle nach dem Huygensschen Prinzipe als Interferenzerscheinungen auffassen lassen. Hieraus resultiert auch eine strengere Begründung der Aberrationsformel; in einem außerhalb der Erdatmosphäre gelegenen, aber mit der Erde starr verbundenen Punkte, wo $c' = c$, $n = 1$ ist, stimmt nämlich offenbar die Konstruktion des relativen Strahles nach Figur 5 mit der elementaren nach Figur 1 überein und die optische Abbildung durch die irdischen Instrumente muß nach Obigem gerade die relative Strahlrichtung im Vakuum liefern.

2b) Einflüsse „zweiter Ordnung". Behält man Glieder der Größenordnung $\frac{v^2}{c^2}$ bei, so wäre nach der Fresnelschen Theorie ein Einfluß der Erdbewegung zu erwarten. Die Experimente haben einen solchen nicht ergeben. Das wichtigste derselben ist das, welches Michelson (1881) ausführte und später (1887) zusammen mit Morley in größerem Maßstabe wiederholte (Fig. 6; vgl. den Artikel „Lichtinterferenz"). Das von Q aus-

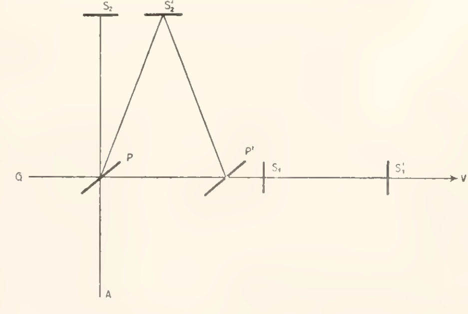


Fig. 6.

gehende Licht wird durch die durchlässig versilberte Glasplatte P in zwei Teile geteilt, die von den Spiegeln S_1, S_2 zurückgeworfen und in A zur Interferenz gebracht werden. Wird der Arm PS_1 (Länge l) in die Richtung der Erdgeschwindigkeit gestellt, so braucht das an S_1 gespiegelte Licht zum Hingange PS_1 die Zeit $\frac{l}{c + v}$, zum

Rückgange S'_1P' die Zeit $\frac{l}{c-v}$, im ganzen also $\frac{2lc}{c^2-v^2}$, oder (bis auf Glieder höherer Ordnung) $\frac{2l}{c}\left(1+\frac{v^2}{c^2}\right)$; es findet also eine Phasenverzögerung $2l\frac{v^2}{c^3}$ statt. Das an S_2 gespiegelte Licht durchläuft im Aether die Seiten PS'_2, $S_2'P'$ des Dreiecks $PS_2'P'$ mit der Basis $2l\frac{v}{c}$ und der Höhe l, also den Weg $2\sqrt{l^2+l^2\frac{v^2}{c^2}}$, und braucht dazu (bis auf Glieder höherer Ordnung) die Zeit $\frac{2l}{c}\left(1+\frac{v^2}{2c^2}\right)$: hier ist die Phasenverzögerung $l\frac{v^2}{c^3}$. Die Differenz der Verzögerungen $l\frac{v^2}{c^3}$ muß sich in einer Verschiebung der Interferenzfransen bei A bemerklich machen, wenn der Apparat um 90° gedreht, die Lage der Arme gegen die Erdgeschwindigkeit vertauscht wird. Durch mehrfache Spiegelungen erreichte Michelson zuletzt den Wert $l = 11$ m; danach wäre für gelbes Licht eine Verschiebung der Fransen um 0,4 ihrer Breite zu erwarten gewesen. Die beobachtete Wirkung betrug weniger als den zwanzigsten Teil davon. Der Erklärung dieser Tatsache stellten sich beträchtliche Schwierigkeiten entgegen. Lorentz und FitzGerald stellten die auf den ersten Blick sehr sonderbare Hypothese auf, daß die erwartete Wirkung durch eine kleine Längenänderung der Arme des Apparates kompensiert werde, die infolge der Bewegung durch den Aether einträte. In der Tat würde eine Verkürzung zweier im Falle der Ruhe gleich langer Linien, die eine parallel der Bewegungsrichtung, die andere senkrecht darauf, im Verhältnis $1 : 1+\frac{v^2}{2c^2}$ eine Phasenbeschleunigung von $l\frac{v^2}{c^3}$ ergeben, die jene Verzögerung gerade aufheben würde. Der Durchmesser der Erde würde danach eine Verkürzung von 6,5 cm erfahren. Die Frage, ob diese Verkürzung der Körper eine Doppelbrechung zur Folge hat, ist von Rayleigh (1902) und Brace (1904) verneinend entschieden worden. Das von Einstein aufgestellte „Relativitätsprinzip" (siehe 3c) ist aus diesen Tatsachen entsprungen.

3. Zusammenhang mit der Elektrodynamik bewegter Medien. 3a) Die Theorie von Hertz. Nach den Vorstellungen der elektromagnetischen Lichttheorie muß sich die Optik bewegter Medien unter die allgemeine Elektrodynamik bewegter Körper einbegreifen lassen. H. Hertz hat (1890) zum ersten Male eine solche Verallgemeinerung der Maxwellschen Theroie vorgenommen, welche auf der Annahme beruht, daß die Erscheinungen nur von den relativen Bewegungen der Körper abhängen. Diese Theorie stellt daher die Unabhängigkeit der irdischen elektromagnetischen Vorgänge von der Bewegung der Erde richtig dar, aber bei der Erklärung der Aberration treten ähnliche Schwierigkeiten auf, wie bei der Theorie von Stokes (vgl. 1a S. 288). Direkt widerlegt wird die Hertzsche Theorie durch den Mitführungsversuch Fizeaus sowie einige elektromagnetische Experimente Eichenwalds über die magnetische Wirkung rotierender elektrisch geladener Kondensatoren.

3b) Die ursprüngliche Elektronentheorie von Lorentz und die Elektrodynamik von Cohn. H. A. Lorentz verknüpfte die Maxwellsche Lehre vom elektromagnetischen Felde mit der Vorstellung, daß die elektrischen Ladungen als „Elektronen" eine atomistische Struktur besitzen. Dabei wird der Aether als ruhend gedacht und alle Wirkung der Materie den Konvektionsströmen der in diese eingebetteten Elektronen zugeschrieben; letztere vertreten den in der Materie „verdichteten" Aether Fresnels, der sich mit ihr bewegt.

Die Grundgleichungen von Lorentz lauten in den Zeichen der Vektoranalysis [1]) und in sogenannten „rationellen Einheiten":

[1]) Zu Vektoranalysis vgl. auch den Artikel „Physikalische Größen". Ein Vektor $\mathfrak{A}$ ist eine Größe, die sich durch Angabe einer gerichteten Strecke (Pfeil) der Länge A beschreiben läßt. Im Gegensatz dazu heißen ungerichtete Größen a Skalare. Die Projektionen $\mathfrak{A}_x$, $\mathfrak{A}_y$, $\mathfrak{A}_z$ von $\mathfrak{A}$ auf die rechtwinkligen Koordinatenachsen heißen die Komponenten von $\mathfrak{A}$ nach den Achsen. Das Produkt $a\mathfrak{A}$ ist ein Vektor mit den Komponenten $a\mathfrak{A}_x$, $a\mathfrak{A}_y$, $a\mathfrak{A}_z$. Das skalare Produkt zweier Vektoren $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$ ist die skalare Größe $\mathfrak{A}\mathfrak{B} = \mathfrak{A}_x\mathfrak{B}_x + \mathfrak{A}_y\mathfrak{B}_y + \mathfrak{A}_z\mathfrak{B}_z = AB\cos(\mathfrak{A}, \mathfrak{B})$; das Vektorprodukt von $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$ ist der Vektor mit den Komponenten $\mathfrak{A}_y\mathfrak{B}_z - \mathfrak{A}_z\mathfrak{B}_y$, $\mathfrak{A}_z\mathfrak{B}_x - \mathfrak{A}_x\mathfrak{B}_z$, $\mathfrak{A}_x\mathfrak{B}_y - \mathfrak{A}_y\mathfrak{B}_x$, dessen Länge (Betrag) gleich $AB\sin(\mathfrak{A}, \mathfrak{B})$ ist und der auf $\mathfrak{A}$ und $\mathfrak{B}$ senkrecht steht. Ist ein Vektor $\mathfrak{A}$ zeitlich und räumlich veränderlich, so bedeutet $\frac{\partial \mathfrak{A}}{\partial t}$ den Vektor $\left(\frac{\partial \mathfrak{A}_x}{\partial t}, \frac{\partial \mathfrak{A}_y}{\partial t}, \frac{\partial \mathfrak{A}_z}{\partial t}\right)$, div $\mathfrak{A}$ den Skalar $\frac{\partial \mathfrak{A}_x}{\partial x} + \frac{\partial \mathfrak{A}_y}{\partial y} + \frac{\partial \mathfrak{A}_z}{\partial z}$ und curl $\mathfrak{A}$ den Vektor $\left(\frac{\partial \mathfrak{A}_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathfrak{A}_y}{\partial z}, \frac{\partial \mathfrak{A}_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathfrak{A}_z}{\partial x}, \frac{\partial \mathfrak{A}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathfrak{A}_x}{\partial y}\right)$. Deutet man $\mathfrak{A}$ als

$$\operatorname{curl} \mathfrak{H} - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathfrak{D}}{\partial t} = \frac{1}{c} \mathfrak{S}$$

$$\operatorname{curl} \mathfrak{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathfrak{B}}{\partial t} = 0 \quad \ldots \ldots \ldots 10)$$

$$\operatorname{div} \mathfrak{D} = \varrho, \operatorname{div} \mathfrak{B} = 0$$

Hier bedeutet $\mathfrak{w}$ die Geschwindigkeit der Materie, ϱ die Dichte der elektrischen Ladungen, $\mathfrak{S} = \varrho \mathfrak{w} + \mathfrak{J}$ den Konvektions- und Leitungsstrom, $\mathfrak{E}$ die elektrische, $\mathfrak{H}$ die magnetische Feldstärke, $\mathfrak{D}$ die elektrische, $\mathfrak{B}$ die magnetische Erregung. Zwischen den letzteren Größen bestehen bei langsamen Bewegungen $\left(\frac{\mathfrak{w}}{c}\text{ klein}\right)$ die Relationen:

$$\mathfrak{J} = \sigma\left(\mathfrak{E} + \frac{1}{c}[\mathfrak{w}\mathfrak{B}]\right),$$

$$\mathfrak{E} = \frac{1}{\varepsilon}\mathfrak{D} - \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)\frac{1}{c}[\mathfrak{w}\mathfrak{B}] \quad \ldots 11)$$

$$\mathfrak{H} = \frac{1}{\mu}\mathfrak{B} + \left(1 - \frac{1}{\varepsilon}\right)\frac{1}{c}[\mathfrak{w}\mathfrak{D}],$$

wo ε die Dielektrizitätskonstante, μ die Permeabilität, σ die Leitfähigkeit bedeuten. Da für Lichtwellen $\varepsilon = n^2$ zu setzen ist, erkennt man in dem Faktor $1 - \frac{1}{\varepsilon}$ den Fresnelschen Mitführungskoeffizienten wieder.

In der Tat entspricht diese Theorie von Lorentz genau der Fresnelschen Hypothese und erklärt somit alle vorher besprochenen optischen Erscheinungen, soweit Größen der Ordnung $\frac{v^2}{c^2}$ vernachlässigt werden. Sie ist auch mit allen elektromagnetischen Erfahrungen im Einklang. Doch erklärt sie nicht ohne weiteres den Versuch von Michelson, der sich auf Größen der Ordnung $\frac{v^2}{c^2}$ bezieht, und es mußte von Lorentz und FitzGerald hierzu jene Kontraktionshypothese herangezogen werden. E. Cohn hat durch Abänderung der Gleichungen 11 dasselbe ohne diese Hypothese zu erreichen gesucht.

c) Das Relativitätsprinzip von Einstein. Die Elektrodynamik von Minkowski. A. Einstein hat diese Kontraktionshypothese zum Ausgangspunkt einer Kritik der physikalischen Begriffe von Raum und Zeit gemacht, aus der diese in neuem Gewande hervorgegangen sind (vgl. den Artikel „Physikalische Prinzipien“). Es stellt sich heraus, daß alle gleichförmig gegeneinander bewegten Bezugssysteme physikalisch gleichwertig, durch keine Messungen voneinander zu unterscheiden sind, wenn beim Uebergang von einem System zum anderen nicht nur die Koordinaten, sondern auch die Zeit t in bestimmter Weise abgeändert (linear transformiert) werden, nämlich so, daß der Ausdruck

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$$

ungeändert bleibt. Ist die Relativgeschwindigkeit v der Systeme parallel der x-Achse, so lauten diese Transformationen:

$$x' = \beta(x - vt),\ y' = y,\ z' = z \quad \ldots 12)$$

$$t' = \beta\left(t - \frac{v}{c^2}x\right),\ \beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Dabei muß $\frac{v}{c} < 1$ vorausgesetzt werden. Die Kontraktion aller Längen in der Bewegungsrichtung ist eine Folge dieser Gleichungen. Ferner bleiben die Lorentzschen Gleichungen (10) (11) im Falle des Vakuums ($\varepsilon = 1$, $\mu = 1$, $\sigma = 0$) invariant. Danach braucht man nicht die Existenz eines „Aethers“ anzunehmen. Die Formeln für die Aberration, das Dopplersche Prinzip, den Mitführungskoeffizienten usw ergeben sich durch einfache Anwendung jener Transformation, allerdings mit Abweichungen in Größen zweiter Ordnung. Enthält z. B. der Ausdruck für eine Lichtwelle im System x, y, z, t den Faktor

$$\sin \nu \left(t - \frac{x \cos \varphi + y \sin \varphi}{c}\right)$$

und im System x′, y′, z′, t′ den Faktor

$$\sin \nu' \left(t' - \frac{x' \cos \varphi' + y' \sin \varphi'}{c}\right),$$

so müssen die Argumente der Sinus auf Grund der Gleichungen (12) ineinander übergehen, und man hat daher

$$\nu' = \nu \frac{\left(1 - \frac{v}{c}\cos \varphi\right)}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad \ldots . 13)$$

Das ist die neue Fassung der Dopplerschen Formel 6, wobei in letzterer der von der Bewegung der Lichtquelle herrührende Nenner fortzulassen ist. Ferner folgt:

$$\cos \varphi' = \frac{\cos \varphi - \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}\cos \varphi} \quad \ldots . 14)$$

setzt man hierin $\varphi' - \varphi = \alpha$, so geht diese Relation näherungsweise in die Aberrationsformel 1 über. Die Gleichungen 13 und 14 und ebenso alle anderen der Relativitätstheorie beanspruchen strenge Gültigkeit für

Strömungsgeschwindigkeit, so gibt div $\mathfrak{A}$ an, wieviel Stromlinien an einer Stelle verschwinden und curl $\mathfrak{A}$ mißt die Wirbelstärke der Strömung. Danach ist der Sinn der angeschriebenen Vektorgleichungen, in den c, ϱ, σ, ε, μ Skalare, $\mathfrak{E}$, $\mathfrak{H}$, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{w}$, $\mathfrak{J}$, $\mathfrak{S}$ Vektoren bedeuten, wohl zu verstehen.

alle Werte des Verhältnisses $\frac{v}{c} < 1$.

Minkowski hat die Elektrodynamik bewegter Körper dem Relativitätsprinzip angepaßt. Dabei bleiben die Lorentzschen Differentialgleichungen (10) bestehen, es ändern sich nur die Verknüpfungsgesetze (11).

Nämlich so:

$$\beta\left(\mathfrak{s}_x - \frac{v}{c}\varrho\right) = \sigma\mathfrak{E}_x,\ \mathfrak{s}_y = \sigma\beta\left(\mathfrak{E}_y - \frac{v}{c}\mathfrak{B}_z\right),$$

$$\mathfrak{s}_z = \sigma\beta\left(\mathfrak{E}_z + \frac{v}{c}\mathfrak{B}_y\right);$$

$$\mathfrak{D}_x = \varepsilon\mathfrak{E}_x,$$

$$\mathfrak{D}_y - \frac{v}{c}\mathfrak{H}_z = \varepsilon\left(\mathfrak{E}_y - \frac{v}{c}\mathfrak{B}_z\right) \quad . \ . \ . \ 15)$$

$$\mathfrak{D}_z + \frac{v}{c}\mathfrak{H}_y = \varepsilon\left(\mathfrak{E}_z + \frac{v}{c}\mathfrak{B}_y\right),$$

$$B_x = \mu\mathfrak{H}_x,$$

$$\mathfrak{B}_y + \frac{v}{c}\mathfrak{E}_y = \mu\left(\mathfrak{H}_y + \frac{v}{c}\mathfrak{D}_z\right),$$

$$\mathfrak{B}_z - \frac{v}{c}\mathfrak{E}_y = \mu\left(\mathfrak{H}_z - \frac{v}{c}\mathfrak{D}_y\right).$$

Die Gleichungen (10) und (15) sind in Strenge invariant gegen die Transformationen (12). Daher haben sie die Unabhängigkeit aller elektromagnetischen Vorgänge von der Geschwindigkeit v der Erde für beliebige Werte von $\frac{v}{c} < 1$ zur Folge. Für kleine Werte von v gehen die Relationen (15) in die Gleichungen (11) über, nur daß $1 - \frac{1}{\varepsilon\mu}$ statt $1 - \frac{1}{\varepsilon}$ steht; da μ für durchsichtige Körper nahezu 1 ist, bleibt also alles bestehen, was über die Lorentzsche Optik langsam bewegter Körper gesagt wurde.

Auch die Minkowskischen Gleichungen lassen eine elektronentheoretische Deutung zu.

Setzt man in Formel (13) $\varphi = \frac{\pi}{2}$, so ergibt sich

$$\nu' = \beta\nu \quad . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ . \ 16)$$

Nach dem Relativitätsprinzip ist also eine Art Dopplerscher Frequenzänderung auch zu erwarten, wenn die Visionsrichtung auf der Geschwindigkeitsrichtung senkrecht ist. Die von Einstein vorgeschlagene Prüfung dieser Folgerung an leuchtenden Kanalstrahlen wäre ein Experimentum crucis über das Relativitätsprinzip; doch scheint es mit den heutigen Mitteln noch nicht ausführbar zu sein.

Literatur. *Zusammenfassende Darstellungen: Encyklopädie d. math. Wiss.* ***H. A. Lorentz,*** *Elektronentheorie Bd. V 12 § 57 bis 63 S. 265 Leipzig 1904. —* ***A. Winkelmann,*** *Handb. der Physik 2. Aufl. Bd. 6 Optik XXXIX (P. Drude). —* ***P. Drude,*** *Lehrb. der Optik II. Abschn. Kap. VIII S. 419 Leipzig 1900. —* ***H. Poincaré,*** *Électricité et optique 3 ième part. Chap. VI S. 518 Paris 1901. —* ***M. Abraham,*** *Elektromagnetische Theorie der Strahlung 2. Abschn. 2. Kap. S. 294 Leipzig-Berlin 1908. —* ***H. A. Lorentz,*** *The theory of electrons Chap. V p. 168 Leipzig 1909. —* ***M. Planck,*** *Vorlesungen über Theorie der Wärmestrahlung 2. Abschn. 2. und 3. Kap. S. 58 Leipzig 1906. — Grundlegende Arbeiten:* ***Bradley,*** *Phil. Trans. London 35 S. 637 1728. —* ***Stokes,*** *Phil. Mag. (3) 27 1854 S. 9 Math. a phys. papers 1 S. 134. —* ***Fresnel,*** *Ann. de chim. et de phys. 9 1818 S. 57 Ouvres complètes 2 S. 627. —* ***Fizeau,*** *Comptes rendus 33 1851 S. 349. —* ***Derselbe,*** *Ann. d. Phys. u. Chem. Erg. 3 1853 S. 457. —* ***Michelson and Morley,*** *Amer. Journ. of Science (3) 31 1886 S. 377. —* ***Michelson,*** *Amer. Journ. of Science (3) 22 1881 S. 20. —* ***Michelson and Morley,*** *Amer. Journ. of Science (3) 34 1887 S. 333. —* ***Rayleigh,*** *Phil. Mag. 4 1902 S. 678. —* ***Brace,*** *Phil. Mag. 7 1904 S. 317. —* ***Hertz,*** *Wiedemanns Ann. 41 (1890) S. 369 Ges. Werke Bd. II 14 S. 256. —* ***Lorentz,*** *Versuch einer Theorie der elektr. und opt. Erscheinungen in bewegten Körpern Leiden 1895. —* ***Cohn,*** *Ann. der Physik 7 1902 S. 29. —* ***Einstein,*** *Ann. d. Phys. 17 1905 S. 891. —* ***Derselbe,*** *18 1905 S. 639. —* ***Derselbe,*** *20 1906 S. 627. —* ***Derselbe,*** *21 1906 S. 583. —* ***Derselbe,*** *23 1907 S. 197 u. 371. —* ***Derselbe,*** *Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 4 1908 S. 411. —* ***Minkowski,*** *Math. Ann. 68 1910 S. 472. —* ***Derselbe,*** *Heft 1 der Fortschr. d. math. Wiss. in Monographien. Hrsg. von O. Blumenthal Leipzig-Berlin 1910.*

M. Born.

Lichtinterferenz.

1. Kohärenz des Lichtes. 2. Fresnelsche Streifen: a) Entstehung der Streifen nach der Wellentheorie. b) Experimentelle Verwirklichung 3. Newtonsche Ringe. Interferenzen gleicher Dicke: a) Entstehung der Interferenz. b) Experimentelle Verwirklichung. 4. Interferenzen an dicken Platten; Interferenzen gleicher Neigung: a) Entstehung der Interferenz. b) Experimentelle Verwirklichung. 5. Interferenzen an zwei dicken Platten. 6 Stehende Lichtwellen.

1. Kohärenz des Lichtes. Wenn zwei verschiedene Lichtbündel auf das gleiche Flächenstück auftreffen, so werden wir erwarten, daß die Helligkeit dieses Flächenstückes gleich der Summe der Helligkeiten ist, die jedes der beiden Lichtbündel für sich allein hervorruft. In der Tat benutzt die Photometrie dies Gesetz der Addition der Einzelhelligkeiten auch ganz allgemein und findet sich hiermit stets mit der Erfahrung in voller Uebereinstimmung. Und doch gibt es von dieser Regel eine sehr auffallende Ausnahme; diese tritt jedoch nur ein, wenn die beiden Lichtbündel ein und derselben Lichtquelle entstammen und nur auf verschiedenen Wegen zu dem Flächenstück hingelangt sind. Solche Lichtstrahlen, die aus dem gleichen Ursprung herstammen,

heißen kohärent. Die Erscheinungen, die beim Zusammentreffen kohärenter Lichtstrahlen unter geeigneten Umständen auftreten können, zeichnen sich durch ganz besondere Regelmäßigkeit aus und machen sich im allgemeinen durch das Auftreten abwechselnd heller und dunkler Streifen irgendwelcher Form bemerkbar, an den Stellen, wo nach der photometrischen Addition der Helligkeit nur eine gleichmäßige Helligkeit zu erwarten war. Diese Erscheinungen werden Interferenzen des Lichtes genannt.

Da bei dem Auftreten von Interferenzen des Lichtes an den Stellen, wo dunkle Streifen liegen, zwei zusammentreffende Lichtstrahlen sich in ihrer Wirkung gegenseitig aufheben, während sie in den dicht daneben liegenden hellen Streifen sich zu doppelter Helligkeit addieren, so schließt man, daß in den Lichtstrahlen sich periodische Zustände entgegengesetzter Natur fortpflanzen, so daß, wenn gleiche Phasen in beiden Strahlen zusammentreffen eine Addition der Wirkung eintritt, bei entgegengesetzter Phase dagegen eine Subtraktion. Das einfachste Beispiel für die Ausbreitung von solchen periodisch entgegengesetzten Zuständen bietet das Fortschreiten irgendwelcher regelmäßiger Wellenzüge. Treffen zwei gleiche derartige Wellenzüge, z. B. Wellen auf einer Wasseroberfläche, zusammen, so wird bei der Vereinigung von Wellenberg in dem einen Zuge mit einem Wellenberg des anderen eine Welle doppelter Höhe entstehen, während ein Wellenberg, der mit einem Wellental des anderen Zuges sich vereinigt, gerade verschwinden wird. Daher hat man auch aus dem Vorhandensein der Lichtinterferenzen auf die Wellennatur des Lichtes geschlossen. Die Länge der einzelnen Lichtwellen ist dabei, wie sich aus den weiter unten besprochenen Interferenzerscheinungen ergibt, allein bestimmt durch die Farbe des Lichtes und jeder wirklich einfarbige Lichtstrahl stellt ein System einer sehr großen Zahl vollkommen regelmäßig hintereinander hereilender Wellen genau gleicher Wellenlänge dar. Man hat bis zu 2½ Millionen solcher ganz gleicher Wellen in einem Wellenzuge nachweisen können. Auffallend bleibt dabei, daß zwei Lichtstrahlen von genau gleicher Farbe, etwa der gleichen Spektrallinie entstammend, die aber von verschiedenen Lichtquellen oder auch nur von verschiedenen Stellen derselben leuchtenden Gasmasse herkommen, doch niemals zu Interferenzerscheinungen Veranlassung geben. Unerläßliche Bedingung für das Auftreten von Interferenzen ist stets, daß beide Strahlen ganz derselben Stelle des lichtsendenden Körpers entstammen, daß sie also kohärent sind. Es muß hieraus geschlossen werden, daß in jedem Lichtstrahl doch auch noch ganz unberechenbare Veränderungen der Intensität und der Phase in außerordentlich rascher Folge vorhanden sein müssen. Treffen dann nicht kohärente Strahlen zusammen, so wird das beim Zusammenfließen von Wellenzügen stets zu erwartende Interferenzbild infolge dieser regellosen Veränderungen so rasch hin und her schwanken, daß unser Auge dem raschen Wechsel nicht zu folgen vermag und nur eine gleichmäßige Helligkeit wahrnimmt. Nur bei kohärenten Strahlen werden beide Teile von den regellosen Wechseln in genau gleicher Weise betroffen, und daher bleibt die Lage des Interferenzbildes völlig unverändert und kann in aller Schärfe gesehen werden.

Wir können uns auch leicht eine Vorstellung von der Ursache der regellosen Veränderungen in einem Lichtstrahle machen, wenn wir bedenken, daß in einer Flamme oder glühendem Gase die einzelnen Moleküle mit ihren Elektronen als die lichtsendenden Körper anzusehen sind. Diese sind aber selbst in unaufhörlicher außerordentlich lebhafter Bewegung, Durcheinanderwirbelung, begriffen; betrachten wir daher eine Stelle in dieser Gasmasse, so wechseln an dieser beständig die Moleküle, und das Licht, das von dieser Stelle ausgeht, entstammt bald diesem, bald jenem Molekül und ist daher nur ein Gemisch einzelner, nicht genau aneinanderschließender Wellenzüge. Daß trotzdem in einem solchen Strahl die große Zahl von 2½ Millionen regelmäßiger Wellen hat nachgewiesen werden können, erklärt sich daraus, daß bei der großen Geschwindigkeit, mit der die Lichtwellen schwingen, diese ganze Wellenmasse bereits in weniger als ein Hundertmillionstel Sekunde ausgesandt wird.

2. Fresnelsche Streifen. 2a) Entstehung der Streifen nach der Wellentheorie. Wir bekommen am schnellsten eine Uebersicht über die beim Lichte zu erwartenden Interferenzerscheinungen, wenn wir uns die Hypothese von der Wellennatur des Lichtes zunutze machen und die verschiedenen Möglichkeiten, unter welchen zwei Wellenzüge sich durchkreuzen können, für sich betrachten. Der einfachste Fall ist der, daß zwei genau gleichartige Wellenzüge von zwei nahe beieinander liegenden Zentren ausgehen und sich nach derselben Seite hin ausbreiten. Es entsteht dann das Bild, welches auf der folgenden Seite in Figur 1 dargestellt ist. A und B sind die beiden Wellenzentren und die stark ausgezogenen Linien verbinden solche Punkte untereinander, in welcher ein Wellenberg des einen Zuges mit einem gleichen des anderen zusammentrifft. Man sieht auch, daß ein Punkt X der einen dieser Kurven um n Wellenlängen (unter Wellenlänge

der Abstand zweier aufeinander folgender Wellenberge verstanden) von A absteht aber um (n + 1) Wellenlängen von B. Der gleiche Unterschied der Abstände von A und B von einer Wellenlänge besteht für alle Punkte der gleichen Kurve; diese Kurve ist also der geometrische Ort aller der Punkte, deren

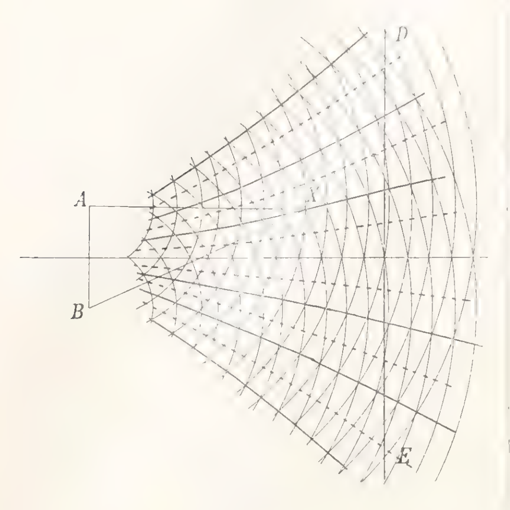


Fig. 1.

Differenz der Abstände von A und B gerade eine Wellenlänge ist, das heißt aber, die Kurve ist ein Hyperbel mit A und B als Brennpunkten. Schreiten die Wellen fort, so bewegen sich die Schnittpunkte der gleichen Wellen auf dieser Kurve entlang; die eingezeichneten Kurven behalten also ihre Lage unverändert bei, wenn die Wellen sich vorwärts bewegen. Man kann solche Wellenzüge herstellen, wenn man an einem federnden Stab zwei vertikale Stifte im Abstande A B befestigt, die eine Quecksilberoberfläche gerade berühren. Setzt man den Stab in Schwingungen, so sieht man die Wellen auf der Oberfläche sich ausbreiten und die in der Figur eingezeichneten Kurven machen sich dadurch bemerkbar, daß in ihnen dauernd doppelt hohe Wellengipfel auftreten. Wenn auch die Wellen selbst so schnell sich folgen, daß man sie einzeln mit dem Auge gar nicht verfolgen kann, die Interferenzkurven mit der gesteigerten Wellenhöhe stehen unverändert fest und sind stets leicht wahrnehmbar. Zwischen den ausgezogenen Kurven sind in der Figur 1 noch punktierte Kurven eingetragen; diese verbinden solche Punkte, in welchen Wellenberg des einen Systems mit Wellental des anderen sich kreuzt, und in denen daher gerade Vernichtung der Wellenbewegung eintritt.

Läßt sich ein solches System von Wellenzügen mit kohärenten Lichtwellenzügen herstellen, so können wir uns die Ebene unserer Figur 1 etwa in DE durch einen weißen Schirm senkrecht durchschnitten denken, dann müssen wir erwarten, daß dort, wo die ausgezogenen Kurven den Schirm treffen, gesteigerte Helligkeit auftritt, an der Stelle der punktierten Kurven jedoch Dunkelheit. Das Bild auf dem Schirm wird daher ein System heller und dunkler Streifen sein müssen, die dort liegen, wo die vollständigen Hyperboloide um A und B den Schirm schneiden.

Bevor wir die verschiedenen Möglichkeiten, diese Erscheinung im Experiment zu verwirklichen, besprechen, wollen wir noch durch eine einfache Rechnung den zu erwartenden Abstand der Streifen in seiner Abhängigkeit von der Länge der Wellen ermitteln. Es seien in Figur 2

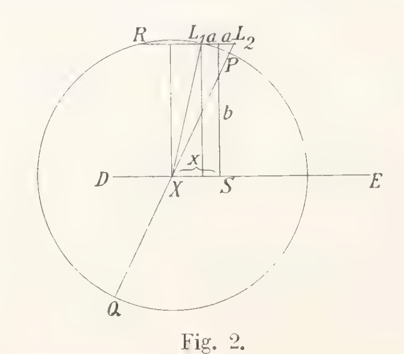


Fig. 2.

L_1 und L_2 die beiden lichtsendenden Punkte deren Abstand 2 a sein mag. DE sei wieder die Spur des Schirms mit der Ebene der Figur. S sei der Punkt der auf DE symmetrisch zu L_1 und L_2 liegt und b sei der Abstand zwischen DE und der Linie $L_1 L_2$. Wir berechnen die Differenz der Abstände eines Punktes X auf dem Schirm von L_1 und L_2. Die Strecke XS sei x. Beschreiben wir noch um X mit XL_1 einen Kreis, auf dem die Punkte PQR, wie in der Figur ersichtlich, liegen, so wird $L_2L_1 . L_2R = L_2P . L_2Q$, nun ist $L_2L_1 = 2\,a$; $L_2R = 2x$, L_2P gleich der gesuchten Differenz δ. $L_2Q = L_2X + L_1X$. Berücksichtigen wir jetzt nur den Fall, der wie sich zeigen wird, für Lichtinterferenzen allein in Frage kommt, daß nämlich L_1L_2 sehr nahe beieinanderliegen, daß b sehr groß und x und a sehr klein im Vergleich zu b sind, dann werden offenbar L_1X und L_2X beide sehr nahe gleich b und wir können wenigstens in erster Annäherung $L_1X + L_2X = 2\,b$ setzen. Dann wird aus unserer Gleichung: $2a . 2x = \delta . 2b$ oder $\delta = \frac{2ax}{b}$

In S selbst treffen offenbar zwei gleiche Wellenphasen zusammen, hier muß also Helligkeit herrschen. Wo δ gleich einer halben Wellenlänge ist, also $\delta = \frac{\lambda}{2}$, dort muß der erste dunkle Streifen beiderseits von S liegen. Der Abstand d dieser beiden Streifen voneinander ist daher

$d = 2x = \frac{b}{a} \cdot \frac{\lambda}{2}$. Die weiteren dunklen Streifen liegen dort wo $\delta = \frac{3}{2}\lambda, \frac{5}{2}\lambda, \frac{7}{2}\lambda$ usw. ist und es zeigt sich, daß der Abstand je zweier benachbarter dunkler Streifen stets gleich $\frac{\lambda b}{2a}$ ist. Die Erscheinung muß sich also darstellen als ein System äquidistanter heller und dunkler Streifen und wenn es gelingt den Streifenabstand d und die Größe b und a zu messen, so läßt sich daraus die Wellenlänge des Lichtes berechnen; es wird bei unserer Bezeichnungsweise $\lambda = \frac{2da}{b}$.

2b) Experimentelle Verwirklichung. Das soeben beschriebene Interferieren zweier Wellenzüge ist mit Lichtwellen zuerst verwirklicht worden durch Fresnel in seinem berühmten Zweispiegelversuch. Er ließ das Licht einer spaltförmigen Lichtquelle von zwei um einen sehr kleinen Winkel gegeneinander geneigten Spiegeln reflektieren, zu deren Schnittlinie der leuchtende Spalt parallel stand. Sind in Figur 3 L der Lichtspalt und S_1 und S_2 die beiden Spiegel, so verlaufen die von den beiden Spiegeln reflektierten Strahlen so, als kämen sie von den beiden Spiegelbildern L_1 und L_2 her und in dem schraffiert gezeichneten Gebiet durchkreuzen sich dann zwei Wellenzüge, die zu Interferenzerscheinungen führen müssen, denn beide Wellenzüge sind in diesem Falle kohärent, da sie ja aus der gleichen Lichtquelle L herstammen. Man beobachtet unter diesen Verhältnissen in der Tat auf einem Schirm, den man senkrecht zur Ebene der Zeichnung den Lichtstrahlen entgegenstellt, das Auftreten ganz scharfer heller und dunkler Streifen in gleichen Abständen voneinander, parallel zum Lichtspalt. Dieses sind die „Fresnelschen Interferenzstreifen“. Ist hierbei der Abstand von Lichtspalt bis zum Schirm 5 m und sind die Spiegelbilder so gestellt, daß der Abstand L_1L_2 gleich 0,5 mm ist, so wird der Abstand zwischen zwei dunklen Streifen auf dem Schirm gleich 6 mm. Danach berechnet sich als Wellenlänge des Lichtes $\lambda = \frac{6 . 0{,}5}{5\,000} =$ 0,0006 mm. Es zeigt sich also, daß in der Tat die Wellen des Lichtes außerordentlich klein sein müssen.

Weiter beobachten wir an den Fresnelschen Interferenzstreifen, daß nur die beiden mittelsten Streifen rein schwarz sind, getrennt durch eine rein weiße mittlere Zone; schon die beiden nächsten dunklen Streifen haben farbige Säume, nach der Mitte des Bildes hin rote nach außen hin blaue Säume, und je weiter wir die Streifen nach außen hin verfolgen desto mehr überwiegen die farbigen Säume, so daß schließlich nur immer mehr ineinanderfließende farbige Streifen übrig bleiben. Schalten wir ein rein rotes Glas in den Strahlengang ein, so wird eine viel größere Zahl rein schwarzer Streifen auf rotem Grunde sichtbar; das gleiche gilt bei Einschaltung eines anderen einfarbigen Glases. Dabei zeigt sich aber, daß bei rotem Glas der Streifenabstand merklich größer als bei grünem und bei diesem wieder größer als bei blauem Glase ist. Die Wellenlänge des Lichtes muß also verschieden sein für verschiedenfarbige Strahlen, für rotes am größten und immer kleiner werdend, je weiter wir die Farbenfolge im Lichtspektrum (vgl. die Artikel „Lichtbrechung“ und „Farben“) nach dem blauen Ende hin verfolgen. Für rotes Licht ergeben sich Wellenlängen von

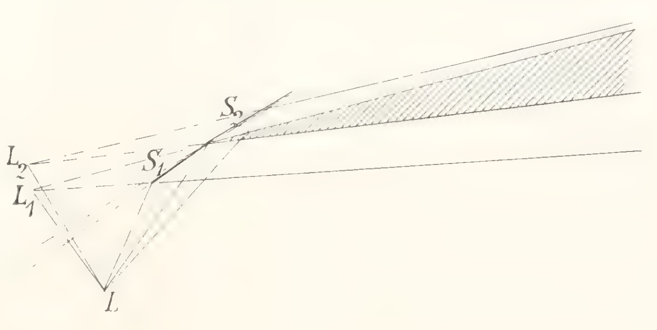


Fig. 3.

0,0007 mm, während die blauen Lichtwellen bis zu 0,0004 heruntergehen. Die im weißen Licht gemessene Wellenlänge von 0,0006 mm entspricht dem gelben Licht, das unserem Auge im Spektrum am hellsten erscheint. Das Auftreten der farbigen Säume und Streifen bei dem mit weißen Licht ausgeführten Fresnelschen Versuch erklärt sich leicht aus der Uebereinanderlagerung der Streifensysteme für die verschiedenen Farben, bei denen die Streifenabstände den ungleichen Wellenlängen entsprechend verschieden groß sind.

Der Fresnelsche Spiegelversuch ist in mannichfacher Weise modifiziert worden. Lloyd hat gezeigt, daß man schon mit einem Spiegel die Interferenzstreifen erhalten kann, indem man das direkte Licht mit dem reflektierten interferieren läßt, nach dem Schema der Figur 4. Bei dieser Anordnung bekommt man im günstigsten Falle das Interferenzbild nur bis zu seiner Mitte zu sehen, wenn der Beobachtungsschirm,

der auch die Gesichtsfeldebene einer Lupe sein kann, unmittelbar am Ende der spiegelnden Fläche bei E aufgestellt ist. Rückt man weiter ab, so bleibt nur ein immer kleinerer Teil des Interferenzbildes sichtbar.

Fresnel selbst hat seinen Doppelspiegel ersetzt durch ein Biprisma, so daß der Strahlenverlauf der Figur 5 entsteht.

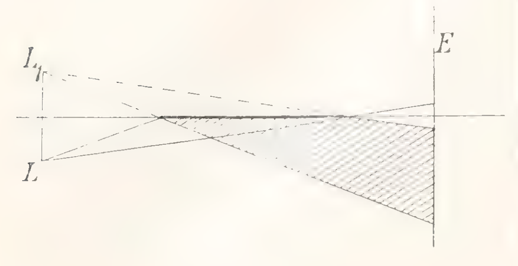


Fig. 4.

Bei diesem Versuch muß der Winkel des Biprismas sehr nahe gleich 180° sein, damit die Streifen nicht gar zu schmal werden. Nach dem Vorschlage von Abbe kann man ein Biprisma mit merklich kleinerem Winkel, das deshalb leichter herstellbar ist, verwenden, wenn man dasselbe in eine Flüssigkeit eintaucht, deren Brechungsindex nur sehr wenig von dem des Glases abweicht. Winkelmann erhielt auf die Weise unter Verwendung von Benzol fingerdicke, tiefschwarze Interferenzstreifen, die leicht in einem großen Hörsaal vorgeführt werden konnten.

Fizeau verwendete zur Erzeugung zweier kohärenter Strahlbüschel zwei schräg gestellte Planplatten in Vereinigung mit einer Linse nach Figur 6.

Durch Zwischenschalten der Planplatten entwirft die Linse zwei getrennte Bilder L'_1 und L'_2 von der Lichtquelle und von dieser gehen dann die kohärenten Wellenzüge aus.

Denselben Zweck erreicht Billot mit einer Linse allein, die er in zwei Teile schneidet und deren Hälften er ein wenig voneinander entfernt, so daß der Strahlengang von Figur 7 entsteht.

Michelson verwendet zwei unter nahezu 90° gegeneinander geneigte Spiegel. Durch doppelte Spiegelung entstehen hier nach Figur 8 zwei sehr nahe beieinander liegende Spiegelbilder L'_1 und L'_2, die die Interferenzstreifen hervorrufen.

Nach diesem Prinzip lassen sich die Interferenzstreifen besonders leicht auffinden, sobald man ein nahezu rechtwinkeliges Glasprisma hat, bei dem der eine Winkel ein klein wenig kleiner als 90° ist. Ein genau rechtwinkeliges Prisma reflektiert das Licht einer Lichtquelle, das senkrecht zur Kante des rechten Winkels einfällt, genau in sich selbst zurück (vgl. den Artikel „Lichtreflexion"), gleichgültig, welches die Winkel an der Hypotenuse sind, und auch wenn das Prisma um die Kante des rechten Winkels gedreht wird. Stellen wir daher einen Lichtspalt einem solchen Prisma gegenüber, jedoch etwas tiefer als dieses auf, so kehrt das reflektierte Strahlbündel gerade oberhalb des Lichtspaltes zurück und kann auf einem Schirm leicht aufgefangen werden.

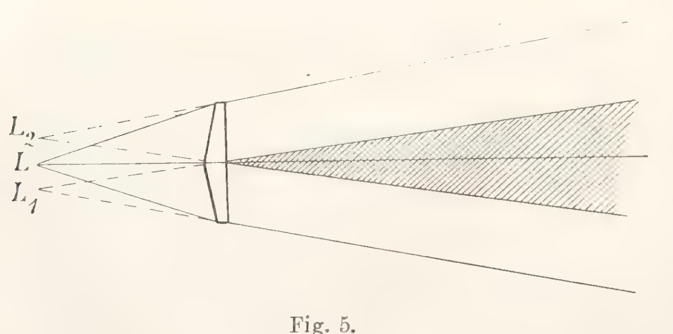


Fig. 5.

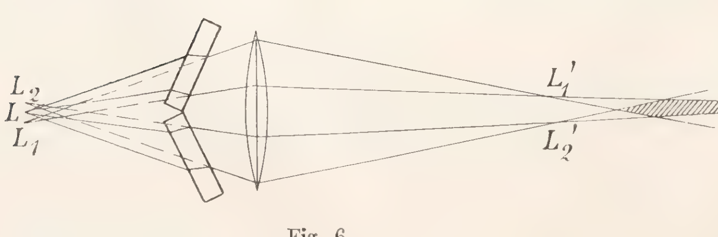


Fig. 6.

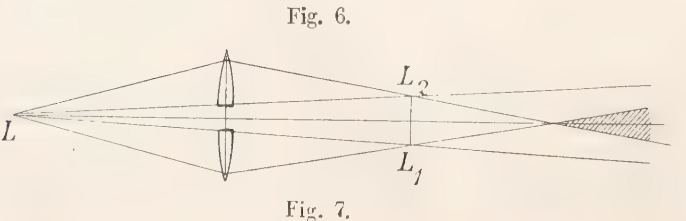


Fig. 7.

Hat das Prisma ganz genau einen rechten Winkel, so entsteht auf dem Schirm nur ein einheitlicher Lichtfleck. Ist der Winkel größer als 90°, so entstehen zwei voneinander getrennte Lichtflecke; ist der Winkel kleiner als 90°, so überdecken sich beide Lichtflecke teilweise, und in dem überdeckten Gebiet sind ohne weiteres die Interferenzstreifen sichtbar. Man kann auf diese Weise auch sehr leicht und schnell bei einem beliebigen nahezu rechtwinkeligen Prisma erkennen, in welchem Sinne sein Winkel von 90° abweicht.

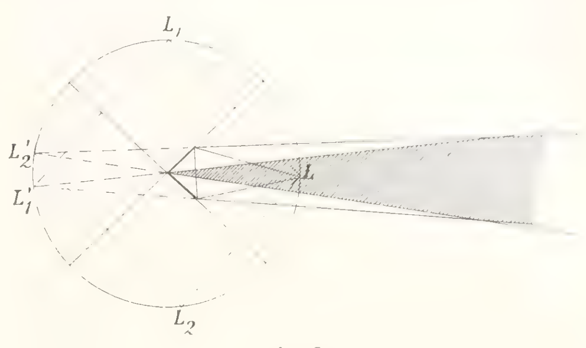


Fig. 8.

Schließlich kann man auch nach Classen mittelst zweier guter planparalleler Glasplatten, die genau gleich dick sein müssen, die Fresnelschen Streifen sehr schön objektiv zeigen nach der Anordnung von Figur 9. Stehen beide Platten P_1 und P_2 senkrecht und einander parallel, so entstehen an P_1 die Spiegelbilder L_1 und L_2 von der Lichtquelle L und von diesen wieder an beiden Flächen von P_2 die Spiegelbilder L'_1 L''_1 L'_2 und L''_2. Die beiden Bilder L''_1 und L'_2 fallen dann, wenn beide Platten genau parallel sind, zusammen. Wird aber P_2 ein klein wenig um eine horizontale Achse gekippt, so rücken die Bilder L''_1 und L'_2 ein klein wenig auseinander, das eine liegt höher als das andere. Diese beiden können also Interferenzstreifen erzeugen, die auf einem Schirm aufzufangen sind. Durch Aenderung der Neigung von P_2 kann man die Streifenbreite leicht in weiten Grenzen verändern und besonders auch recht groß machen, so daß sie weithin sichtbar sind. Als Lichtquelle braucht kein Spalt genommen zu werden, sondern es genügt der positive Krater einer Bogenlichtlampe.

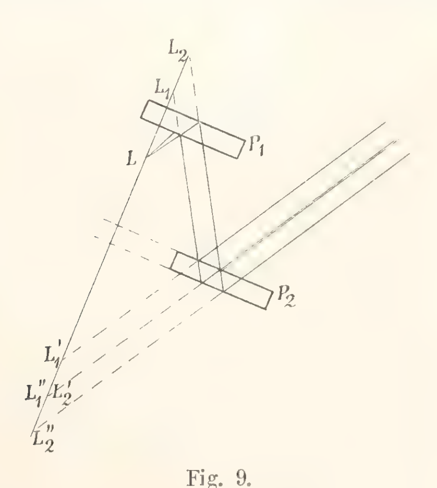


Fig. 9.

Diese Anordnung zweier planparalleler Platten ist im übrigen ein besonderer Fall der Erzeugung von Interferenzstreifen an zwei Platten, auf den weiter unten unter 5 noch zurückzukommen sein wird.

3. Newtonsche Ringe. Interferenzen gleicher Dicke. 3a) Entstehung der Interferenz. Eine zweite Art der Entstehung von Interferenzerscheinungen bietet sich stets, wenn eine dünne Lamelle einer durchsichtigen Substanz sich in einem Medium von anderem Brechungsindex befindet, z. B. eine Seifenlamelle in Luft. Fällt auf eine solche Lamelle Licht, so tritt sowohl an der Vorder- wie an der Hinterfläche der Lamelle Reflexion ein, und die beiden reflektierten Lichtmassen können zur Interferenz gebracht werden. Aus Figur 10

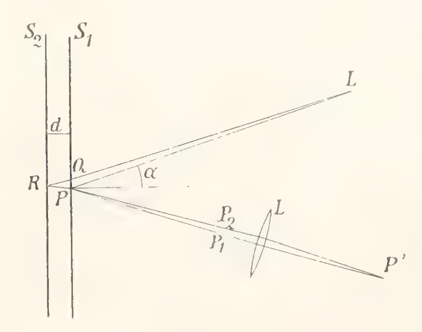


Fig. 10.

geht das Zustandekommen dieser Interferenz hervor. Hier bedeuten S_1 und S_2 die vordere und hintere Grenzfläche der dünnen Schicht, L ist ein Punkt einer Lichtquelle. Ein Lichtstrahl, der von L aus den Punkt P der Vorderfläche der Lamelle erreicht, wird nach P_1 reflektiert. Es läßt sich dann stets ein zweiter von L ausgehender Strahl LQR

auffinden, der von der Hinterfläche der Schicht reflektiert wird und ebenfalls nach P hingelangt. Dieser verläßt die Schicht in der Richtung nach P_2 hin. Die beiden durch P_1 und P_2 gehenden Strahlen sind nun je nach der Dicke der Lamelle um eine bestimmte Zahl von Wellenlängen gegeneinander verschieden und sie werden daher Interferenz ergeben müssen, sobald sie, die zunächst divergent sind, wieder zur Vereinigung gebracht werden. Dies geschieht durch Einschaltung einer Linse L, die in P′ ein Bild von P entwirft. In P′ muß dann die Interferenz zustande kommen. Charakteristisch für diese Art von Interferenzen ist also, daß sie nicht wie die vorigen an beliebiger Stelle eines ausgedehnten Raumgebietes durch einen Schirm aufgefangen werden können, sondern daß sie nur entstehen in dem Bilde, das eine Linse von der Vorderfläche der Lamelle entwirft. Die Linse kann dabei auch durch die Linse unseres Auges und die Bildfläche durch unsere Netzhaut ersetzt werden; d. h. dann, wir sehen diese Art von Interferenzen auf der Vorderfläche der Lamelle.

Zur genaueren Bestimmung dieser Interferenzen muß der Wegunterschied der beiden Strahlen LP und LQRP berechnet werden. Dieser ist gleich 2QR — (LP — LQ). Ist α der Einfallswinkel des Strahls LP, d die Dicke der Schicht und n ihr Brechungsindex, so ergibt eine einfache Rechnung den Wert des Wegunterschiedes zu $\delta = 2d\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha}$. Nun ist in Wirklichkeit die Lichtquelle niemals nur punktförmig, sondern stets mehr oder weniger ausgedehnt. Daher wird P auch von Strahlen erreicht, die einen anderen Einfallswinkel als α haben und von P geht nach der Linse hin ein ganzer Kegel von Strahlenpaaren, der zwischen dem größten Reflexionswinkel α_1 und dem kleinsten α_2 eingeschlossen sein mag. Alle Strahlenpaare dieses Kegels gelangen in P′ zur Vereinigung, und, da die Wegdifferenz in den Paaren von α abhängt, so kann im allgemeinen durch diese ganze Strahlenmasse noch gar keine einheitliche Interferenzwirkung in P′ entstehen. Der Unterschied der Wegdifferenzen für die äußersten Strahlenpaare wird sein $\delta_1 - \delta_2 = 2d\left(\sqrt{n^2 - \sin^2\alpha_1} - \sqrt{n^2 - \sin^2\alpha_2}\right)$. Sind dann α_1 und α_2 gegeben, entweder durch die Ausdehnung der wirksamen Lichtquelle, oder wenn diese sehr ausgedehnt ist, durch die Größe der benutzten Linse, so läßt sich offenbar zu α_1 und α_2 nach obiger Formel stets eine Schichtdicke d so berechnen, daß $\delta_1 - \delta_2$ kleiner als $\frac{\lambda}{2}$ wird. Bei dieser Schichtdicke werden dann, wenn das mittlere Strahlenpaar eine bestimmte Wegdifferenz besitzt, z. B. gerade eine ungerade Zahl von halben Wellenlängen, so daß Auslöschung dieses Strahlenpaares eintritt, die äußersten Strahlen des wirksamen Lichtkegels noch Wegdifferenzen aufweisen, die nur um $\frac{\lambda}{4}$ anders sind als die des mittleren; sie werden also noch Interferenzen haben, die zwar mit der des mittleren nicht genau übereinstimmen, aber doch nur so wenig abweichen, daß sie die Interferenzerscheinung der mittleren Strahlen nicht zu verdecken vermögen.

Als zweites Charakteristikum dieser Interferenzerscheinung ergibt sich daher, daß das Auftreten derselben gebunden ist an eine innige Wechselbeziehung zwischen der Schichtdicke und der Oeffnung des wirksamen Lichtkegels. Je größer der letztere und auch je schräger man auf die Lamelle hinsieht, desto dünner muß die Lamelle sein. Daher werden diese Erscheinungen vorwiegend an dünnen Blättchen beobachtet und sind als Farben dünner Blättchen bekannt. Bei dickeren Schichten können sie nur verfolgt werden, wenn die Linse hinreichend klein abgeblendet wird und möglichst senkrechter Einfall gewählt wird, damit die Winkel α an sich schon möglichst klein werden.

Sind diese Bedingungen zum Zustandekommen einer einheitlichen Interferenzerscheinung im Gesichtsfelde der Linse erfüllt, dann hängt die Art der Interferenz an jeder Stelle des Gesichtsfeldes, d. h. ob dort Helligkeit oder Dunkelheit herrscht, nur noch von der Dicke der Schicht an der entsprechenden Stelle ab. Im Gesichtsfelde werden also alle Punkte gleicher Schichtdicke durch die gleiche Interferenzlinie verbunden. Wir bekommen im einfarbigen Lichte ein System heller und dunkler Interferenzkurven, die stets Punkte gleicher Schichtdicke verbinden; der Dickenunterschied an Stellen, die auf benachbarten Interferenzkurven liegen, ist gleich einer halben Wellenlänge. Diese Interferenzen heißen daher auch „Interferenzen gleicher Dicke".

Schließlich sei noch bemerkt, daß die Berechnung der Interferenz aus dem einfachen Unterschied der Weglängen der beiden Strahlen eines Paares noch nicht zu den richtigen Werten führt; da hierbei jedenfalls für einen der beiden Strahlen die Reflexion im dichteren der beiden Medien eintritt, und unter diesen Verhältnissen bei der Reflexion stets eine Phasenverschiebung um eine halbe Wellenlänge eintritt (vgl. im Artikel „Lichtpolarisation" Fresnelsche Gleichungen), so muß die berechnete Wegdifferenz noch um eine halbe Wellenlänge vermehrt werden, um die richtigen Interferenzverhältnisse zu erhalten.

Eine ganz analoge Interferenzerscheinung, wie hier für reflektiertes Licht beschrieben, läßt sich auch am durchfallenden Licht beobachten. Auch bei diesem läßt sich zu jedem durchtretenden Lichtstrahl ein zweiter zuordnen, der in diesem Falle in der Schicht zweimal reflektiert ist. Die berechnete Wegdifferenz ist für diesen ebenso wie beim vorigen Fall; es lassen sich überhaupt alle eben ausgeführten Betrachtungen auf diesen Fall unmittelbar übertragen. Auch im durch-

fallenden Licht erhalten wir daher ganz analoge Interferenzkurven gleicher Dicke, nur fällt in diesem Falle der Phasenverlust von einer halben Wellenlänge fort; die Berechnung der Interferenz auf Grund der einfachen Wegdifferenz der Lichtstrahlen gibt unmittelbar richtige Werte. Daraus schließen wir sofort: die Interferenzerscheinungen im reflektierten und im durchfallenden Lichte sind zueinander komplementär.

3b) Experimentelle Verwirklichung. Der Grundversuch, an dem die eben besprochenen Interferenzerscheinungen zuerst beobachtet und richtig gedeutet wurden, ist der Versuch mit „Newtons Farbenglas". Dies besteht aus einer Plankonvexlinse, die mit der gekrümmten Fläche auf ein Planglas gelegt ist. Auf die Weise entsteht zwischen zwei Glasmassen eine dünne Luftschicht, deren Dicke in der Mitte Null ist und die von dort aus nach allen Seiten in leicht berechenbarer Weise an Dicke zunimmt. Aus Figur 11 folgt,

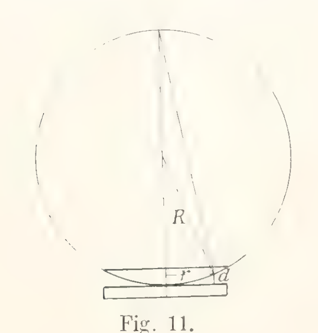


Fig. 11.

wenn d die Dicke der Luftschicht im Abstande r von der Mitte und R der Krümmungsradius der Linse ist, $r^2 = d(2R-d)$, oder wenn das kleine d gegen 2R vernachlässigt wird, $r^2 = 2dR$. Beleuchten wir dies Plattensystem senkrecht von oben und beobachten das reflektierte Licht, so erscheint ein System heller und dunkler Ringe. Die Mitte ist dunkel, der erste dunkle Ring ist dort, wo $d = \frac{r^2}{2R}$ gleich einer ganzen Wellenlänge des auffallenden Lichtes ist, denn wegen der oben erwähnten Phasenverschiebung des einen der reflektierten Strahlen sind dann die beiden reflektierten Strahlen um $^3/_2\,\lambda$ gegeneinander verschieden. Der zweite dunkle Ring hat einen Radius, der sich aus $\frac{r^2}{2R} = 2\lambda$ berechnet. Die Radien der dunkeln Ringe verhalten sich im reflektierten Licht also wie $\sqrt{2}:\sqrt{4}:\sqrt{6}$ usw. wie die Quadratwurzeln aus den geraden Zahlen. Im durchfallenden Licht beobachten wir die komplementäre Erscheinung, hier stehen die Radien der dunklen Ringe im Verähltnis der ungeraden Zahlen und die Mitte ist hell.

Stellen wir ein Newtonsches Farbenglas aufrecht auf ein Blatt weißen Papiers und blicken schräg von oben auf die eine Seite des Glases, so sehen wir das Ringsystem im reflektierten Licht, wenn wir die hinter dem Glase liegende Fläche mit schwarzem Papier bedecken; dagegen sehen wir das Ringsystem im durchfallenden Licht, wenn wir die vordere Fläche schwarz bedecken. Lassen wir beide Flächen weiß, so wird gar kein Ringsystem sichtbar, da beide Ringsysteme genau komplementär sind und daher bei gleichzeitigem Auftreten sich auslöschen.

Mißt man bei genau senkrechter Beleuchtung des Farbenglases die Radien r des n ten Ringes aus, so kann man aus der Formel $\frac{r^2}{2R} = n\lambda$ den Krümmungsradius R der Linse sehr genau berechnen.

Nur wenn die Beobachtung am Newtonschen Glase mit einfarbigem Lichte geschieht, hat man ein scharfes System heller und dunkler Ringe. Wird weißes Licht benutzt, so lagern sich wieder die Ringsysteme der verschiedenen Farben ungleichmäßig übereinander; die Ringe der nach dem blauen Ende des Spektrums hin liegenden Farben sind kleiner als die der roten Farben. Es tritt also schon dort Auslöschung des Blau ein, wo die rote Farbe noch hell ist; daher erhält der innerste Ring bei weißem Licht immer einen roten und außen einen blauen Saum und nach außen hin entsteht anstatt dunkler Ringe sehr bald ein System ringförmig angeordneter Mischfarben. Newton hat diese Farben in Ordnungen eingeteilt und nach der Farbenbezeichnung von Rollet entspricht einer Dicke der Luftschicht von

mm	Farbe	
0,000 114	Hellavendelgrau	erster Ordnung
0,000 148	Strohgelb	
0,000 168	Braungelb	
0,000 276	Violett	zweiter Ordnung
0,000 360	Himmelblau	
0,000 432	Gelb	
0,000 492	Rot	
0,000 552	Purpurviolett	dritter Ordnung
0,000 602	Blaugrün	
0,000 666	Grün	
0,000 712	Fahlgelb	
0,000 828	Mattpurpur	vierter Ordnung
0,000 954	Graugrün	

Am lebhaftesten sind die Farben zweiter Ordnung, die Farben der übrigen Ordnungen sind um so weißlicher, je weiter sie von denen der zweiten Ordnung entfernt liegen. Da die gleichen Farbenmischungen auch bei sehr vielen anderen Interferenzerscheinungen wiederkehren, insbesondere in der Kristalloptik, so gibt die Bezeichnungsweise nach

den Newtonschen Ordnungen häufig eine bequeme Orientierung. Die angeführten Dicken in Millimetern entsprechen aber nur dann den beistehenden Farben, wenn die dünne Lamelle, wie beim Newtonschen Farbenglas eine Luftschicht ist, und die Strahlen senkrecht einfallen. Ist der Brechungsindex der dünnen Schicht gleich n, so sind die obengenannten Dicken noch durch n zu dividieren, um den gleichen Farben zu entsprechen.

Wir haben damit ohne weiteres auch die Erklärung erhalten für eine zweite Interferenzerscheinung dieser Art, nämlich die „Farben dünner Blättchen". Jedes dünne Blättchen aus Glas, Glimmer, Seifenhaut oder ähnlichem muß, wenn seine Dicke im Bereich der oben genannten Größenordnung ist, im reflektierten Licht stets die der Dicke entsprechende Interferenzfarbe zeigen und im durchfallenden Licht die Komplementärfarbe. Die Farben im durchfallenden Lichte werden nur undeutlicher hervortreten, da sie stets von einer Menge direkt hindurchtretenden Lichtes überstrahlt werden. Auf diese Weise kommen also die zum Teil sehr prächtigen Farben der Seifenblasen zustande, und ein im Unterscheiden der Newtonschen Farbenordnungen geübtes Auge wird leicht aus der Beschaffenheit der Farbe auf die Dicke der Lamelle schließen können. Auch hierbei ist leicht zu beobachten, daß die Farben auf der Oberfläche der Lamelle gesehen werden, daß es sich also um eine Interferenzerscheinung der eben besprochenen Art handelt. Man kann an einer Seifenblase die infolge ungleichen Abströmens von Seifenwasser entstehenden ungleichen Dicken an einzelnen Teilen an der Anordnung der Farben unmittelbar sehen.

Eine für viele Zwecke vorteilhafte Abänderung des Newtonschen Farbenglases erhalten wir, wenn wir zwei Spiegelglasplatten so aufeinanderlegen, daß ein keilförmiger Luftspalt entsteht. An Stelle der dunklen Ringe erhalten wir dann bei einfarbigem Licht dunkle gerade äquidistante Interferenzstreifen, die parallel der Keilkante sind. Durch Abzählen der Streifen von der Kante her kann man wieder direkt die Dicke des Luftspaltes an den einzelnen Stellen ermitteln. Mit dieser Versuchsanordnung ist von Fizeau untersucht worden, bis zu welcher Dicke der Luftschicht sich diese Interferenzen verfolgen lassen. Er ordnete zwei Planplatten übereinander an, so daß sie einen keilförmigen Spalt zwischen sich ließen. Dann fixierte er einen Punkt der Unterseite der oberen Platte und bewegte nun die untere Platte genau parallel abwärts. Bei Beleuchtung mit homogenem Licht vertikal von oben sah er dann die Interferenzstreifen vor dem fixierten Punkte vorüberwandern und konnte sie dabei zählen. Bei Verwendung von Natriumlicht beobachtete Fizeau, daß nach 490 Interferenzen die Streifen verschwanden. Bei weiterem Entfernen der unteren Platte treten sie jedoch wieder auf, um nach abermals 490 Streifen wieder ihre größte Deutlichkeit zu zeigen. In gleicher Weise zeigte sich auch weiter nach je 490 Streifen größte Undeutlichkeit und dann wieder größte Deutlichkeit, so daß sich die Erscheinung in Gruppen von je 980 zusammenfassen ließ. Im ganzen ließen sich so 52 Grupen verfolgen, so daß im ganzen etwa 50 000 Interferenzen beobachtet wurden; erst darüber hinaus verschwand die Erscheinung vollständig. Einer Zahl von 5000 Interferenzstreifen entspricht eine Dicke der Luftschicht von 50 000 . 0,0006 = 30 mm. Das periodische Undeutlichwerden der Streifen bei diesem Versuch erklärt sich aus der Natur des Natriumlichtes, das in Wirklichkeit aus zwei Teilen von etwas verschiedener Wellenlänge besteht. Es entstehen daher in Wirklichkeit zwei Streifensysteme von etwas ungleichem Streifenabstand und auf der Strecke von 490 Streifen des inneren Systems liegen 490,5 des anderen, so daß nach 490 Streifen die des einen gerade auf die Lücken des anderen fallen und dadurch die Erscheinung verwischen. Nach 980 Streifen ist das eine System um eine ganze Streifenbreite hinter dem anderen zurück. Der Grund, weswegen nicht noch mehr als 50 000 Interferenzen beobachtet werden konnten, liegt in dem Prinzip derselben. Wir sahen, daß mit Dickerwerden der Schicht der wirksame Strahlenkegel immer enger abgeblendet werden muß, damit nach dieser Methode überhaupt noch Streifen möglich sind. Wir erhalten daher schließlich zu geringe Lichtstärken.

Fizeau hat dann das Prinzip dieser Methode benutzt, um sehr kleine Dickenänderungen genau zu messen. Oberhalb eines Tischchens T (Fig. 12) ruht, durch

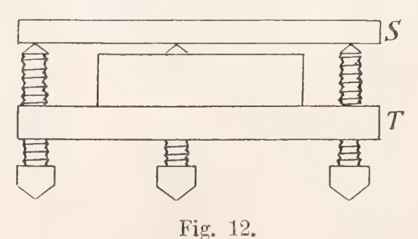


Fig. 12.

drei Schrauben getragen, eine Spiegelglasplatte S. Durch die drei Schrauben wird diese so justiert, daß zwischen ihrer Unterfläche und der Oberfläche des Tischchens ein keilförmiger Raum entsteht, der die parallelen Interferenzstreifen entstehen läßt.

Bei Temperaturänderung dieses Systems dehnen die die Platte tragenden Schrauben sich aus; man beobachtet das hierbei eintretende Wandern der Interferenzstreifen und berechnet hieraus den Ausdehnungskoeffizienten der Schrauben. Legt man dann einen Klotz irgendwelchen anderen Materials mit plangeschliffener Oberfläche auf das Tischchen, so kann man die Interferenzen zwischen der Oberfläche dieses Klotzes und der Glasplatte beobachten und aus dem Wandern dieser Streifen bei Temperaturänderung nunmehr den Ausdehnungskoeffizienten des Klotzes berechnen. Figur 13 zeigt schematisch die Anordnung dieses Fizeauschen Dilatometers in der von Abbe gegebenen Ausführungsweise. Das Licht einer Spektralröhre G wird nach dem Prinzip der Autokollimation (vgl. den Artikel „Spektroskopie)“ von der Seite in das Fernrohr eingeführt und durch das kleine Prisma P in die Achse des Fernrohres gelenkt. Es wird dann durch die Prismen P_1 und P_2 spektral zerlegt und am Interferenzapparat reflektiert. Je nach der Stellung des Fernrohres gelangt dann nur das Licht einer bestimmten Farbe neben P vorbei in das Okular. Dieses in Verbindung mit dem Fernrohrobjektiv O erblickt dann die Oberfläche des Interferenzapparates J in dem Lichte dieser einen Farbe und sieht daher die Interferenzstreifen rein schwarz auf hellem Grunde.

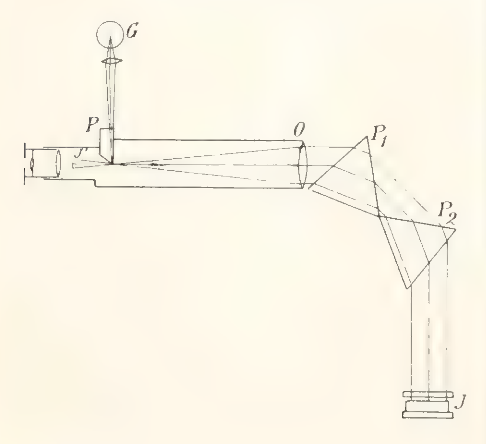


Fig. 13.

In sehr sinnreicher Weise hat ferner Michelson die Methode dieser Interferenzen zu äußerst feinen Messungen verwendet. Bei seinem Interferometer (Fig. 14) fällt das Licht einer weißen Lichtquelle L auf die an der Vorderseite halb durchlässig versilberte Planplatte P. Von hier wird ein Teil nach dem Spiegel S_1 reflektiert, kehrt von hier zurück und gelangt durch P hindurch in das Beobachtungsfernrohr F. Der andere Teil durchdringt P, erreicht den Spiegel S_2 und wird auf dem Rückwege von P nach F hin reflektiert. Sind die Spiegel so gestellt, daß das Spiegelbild von S_2 in der Vorderfläche von P in S'_2 liegt, so verlaufen die in das Fernrohr gelangenden Strahlen so, als wären sie von der keilförmigen Schicht S_1S_2' reflektiert und das Fernrohr F sieht daher in der Ebene S_1 die Fizeauschen Interferenzstreifen. In diesem Falle ist die Mitte hell, dann folgen beiderseits zwei dunkle Streifen und dann weiter Streifen mit farbigen Säumen. Weil bei dieser Anordnung der über S_2 geführte Strahl dreimal die Platte P passieren muß, während der andere sie nur einmal passiert, ist noch eine zweite gleiche, aber nichtversilberte Platte P′ angebracht, um beiden Strahlenbündeln genau die gleichen Lichtverluste durch Reflexion und Absorption zu geben.

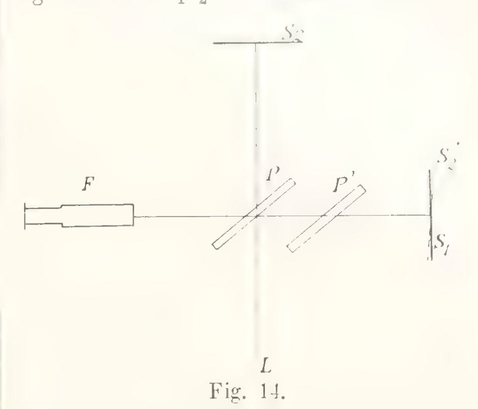


Fig. 14.

Indem Michelson diese ganze Versuchsanordnung auf einen großen Sandsteinblock setzte, der auf Quecksilber schwamm, konnte er sie leicht in beliebige Himmelsrichtungen orientieren. Er konnte das eine Strahlenbündel in die Richtung der Erdbewegung, das andere senkrecht dazu anordnen und dann beide Richtungen miteinander vertauschen. Wenn dann die Erdbewegung auf die Lichtgeschwindigkeit von irgendwelchem Einfluß war, mußte sich das darin zeigen, daß die Zahl der Wellenlängen, die auf dem einen Strahlenwege Platz hatte, eine andere war, wie die auf dem anderen. Bei Vertauschung der beiden Strahlenrichtungen durch Drehung der Sandsteinplatte um 90° mußte dann eine Verschiebung der Interferenzstreifen eintreten. Da eine solche in Wahrheit nicht eintrat, mußte geschlossen werden, daß die Lichtgeschwindigkeit von der Erdbewegung nicht beeinflußt wird. Die weiteren hieraus folgenden Schlüsse siehe in den Artikel „Lichtfortpflanzung in bewegten Medien“.

Eine andere wichtige Anwendung seines Interferometers machte Michelson bei der

genaueren Vergleichung zweier Maßstäbe, deren Längen sich sehr nahe wie 1: 2 verhalten. Zu dem Zwecke wurden die Maßstäbe an ihren Enden mit zwei parallelen spiegelnden Flächen I und II versehen nach Art der Figur 15. Die beiden Maßstäbe kamen

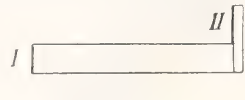


Fig. 15.

dann an Stelle des Spiegels S_1 in das Interferometer wie in Figur 16 angegeben. Durch Verschieben von S_2 konnte dann die Ebene S'_2 nacheinander in die Lagen S'_2, S''_2 und S'''_2 gebracht werden. Lagen dann die Vorderspiegel I und I′ der Maßstäbe genau in

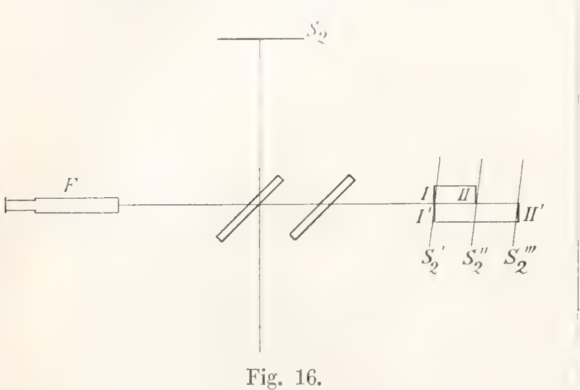


Fig. 16.

einer Ebene, so mußte in der Stellung S'_1 in der unteren Hälfte des Gesichtsfeldes das normale Newtonsche Streifensystem sichtbar werden (Fig. 17 a). Dann wurde S'_2 bis nach S''_2 bewegt, so daß in der linken Hälfte des oberen Gesichtsfeldes gerade das halbe Streifensystem zu sehen war (Fig. 17 b). Dann wurde der kleinere Maßstab um seine eigene Länge verschoben, bis das Bild Figur 17c sichtbar wurde. War dann der eine

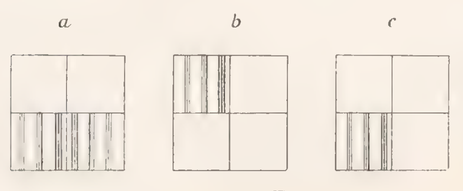


Fig. 17.

Maßstab genau doppelt so lang wie der andere, so mußte jetzt bei Verschieben von S''_2 nach S'''_2 die Figur 17 d erscheinen. Bestand eine kleine Abweichung in diesem Längenverhältnis, so zeigte sich dies darin, daß das Streifensystem in der einen Hälfte des Gesichtsfeldes nicht genau an das der anderen Hälfte anschloß. Aus der Verschiebung der Streifensysteme gegeneinander konnte die Abweichung des Längenverhältnisses von dem genauen Werte 1: 2 bis auf $^1/_{20}$ Wellenlänge genau bestimmt werden. Ueber die weitere Verwertung dieser Methode zur genauen Ausmessung des Meters in Wellenlänge siehe unter Interferenzen gleicher Neigung.

Noch eine weitere Verwendung der Newtonschen Streifen machte Michelson in der in Figur 18 dargestellten Versuchs-

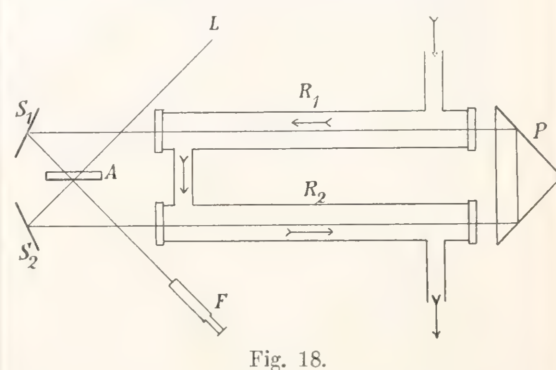


Fig. 18.

anordnung zur Ermittelung des Grades der Mitführung von Lichtwellen in bewegten Medien. L ist wieder die Lichtquelle, F das Beobachtungsfernrohr, A eine auf der einen Seite halbdurchlässig versilberte Platte, S_1 und S_2 Spiegel und P ein total reflektierendes Prisma. Der Spiegel S_1 erhält eine solche Stellung, daß sein Spiegelbild wieder eine sehr kleine Neigung gegen S_2 hat. Das Fernrohr sieht dann in der Ebene S_2 die Newtonschen Streifen. In den Strahlengang ist dann das mit planparallelen Fenstern verschlossene Rohrsystem R_1R_2 eingeschaltet. Strömt durch dies Rohrsystem eine Flüssigkeit in der Pfeilrichtung, so erhält man die Newtonschen Streifen in einer bestimmten Lage; kehrt man die Strömungsrichtung um, so werden die Streifen sich verschieben, falls die Strömungsgeschwindigkeit überhaupt einen Einfluß auf die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes hat, und die Größe dieses Einflusses kann dann sehr genau gemessen werden. Fizeau hatte bereits einen ähnlichen Versuch mit dem gleichen positiven Erfolge wie Michelson ausgeführt, doch erreichte seine Erzeugungsweise von Interferenzen an Schärfe noch nicht die der Michelsonschen Anordnung. Fizeau beobachtet in seiner Versuchsanordnung ein Fresnelsches und nicht ein Newtonsches Streifensystem.

4. Interferenzen an dicken Platten. Interferenzen gleicher Neigung. 4a) Entstehung der Interferenz. An einer genau planparallelen durchsichtigen Schicht kann noch auf eine zweite Art durch Vermittelung einer Linse eine Interferenzerscheinung zustande kommen.

Ein nach Figur 19 auf die Schicht S unter irgendeiner Neigung auffallender Strahl tritt zum Teil hindurch, zum Teil werden durch mehrfache Reflexionen im Innern der Schicht Strahlen von ihm abgespalten, die nun

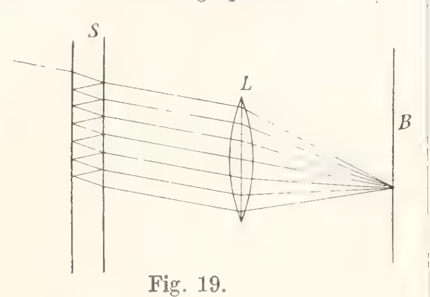


Fig. 19.

alle in der gleichen Richtung die Schicht verlassen. Durch eine Linse L werden alle diese Strahlen in demselben Punkte der Brennebene B der Linse vereinigt. Auch alle anderen, dem ersten parallel einfallenden Strahlen werden mit ihren Teilstrahlen an derselben Stelle der Brennebene vereinigt. Offenbar ist dann die Differenz zwischen je zwei benachbarten Teilstrahlen immer die gleiche und nur durch die Richtung des einfallenden Strahls bestimmt. Die Gesamtheit der Strahlen gleicher Richtung muß also eine einheitliche Interferenzwirkung ergeben. Schon hieraus können wir schließen, daß die in der Brennebene der Linse sich zeigende Interferenzerscheinung ein System zur Linsenachse konzentrischer Ringe sein muß. Bei dieser Interferenzerscheinung verbindet eine Interferenzlinie alle solchen Punkte, die von Strahlen erreicht werden, die unter gleicher Neigung die Schicht durchsetzt haben. Diese Kurven können daher auch Interferenzen gleicher Neigung genannt werden. Sie erscheinen in der Brennebene der Linse oder werden, bei subjektiver Betrachtung, nicht in der Schicht, sondern in unendlicher Ferne gesehen. Hauptbedingung für das Entstehen dieser Erscheinung ist, daß die Schicht sehr gut planparallel ist, denn nur wenn die abgezweigten Teilstrahlen auch noch in gleicher Richtung die Platte verlassen, werden sie in demselben Punkt der Brennebene vereinigt; die Dicke der Schicht kann dabei sehr groß sein. Das Sichtbarwerden dieser Interferenzkurven ist stets ein Beweis für die gute Planparallelität der Schicht; sehr geringe Abweichungen von der Planparallelität machen sich dadurch kenntlich, daß die Kurven nicht genaue Kreise sind, sondern zu Ellipsen oder sonstwie ein wenig deformiert sind. Anstatt in durchfallendem Lichte können auch diese Interferenzen im reflektierten Lichte beobachtet werden; da in diesem Falle eine ungerade Zahl innerer Reflexionen eintritt, unterscheidet sich die Erscheinung im reflektierten Licht von der im durchfallenden Licht dadurch, daß bei ihr in die Interferenz wieder eine Phasenverschiebung von einer halben Wellenlänge hineinkommt. Im reflektierten Licht muß also die Erscheinung komplementär zu der im durchfallenden Licht sein.

Charakteristisch für diese Interferenzen an dicken Schichten ist ferner, daß sie nur in einfarbigem Licht sichtbar sind. Die Differenz zweier benachbarter Teilstrahlen beträgt wegen der Dicke der Schicht stets schon eine große Anzahl von Wellenlängen, und daher brauchen im einfallenden Licht nur Wellenzüge von ganz wenig verschiedener Wellenlänge zu sein, um Interferenzringe zu erzeugen, die schon ganz verschiedene Durchmesser haben und sich daher gegenseitig verwischen. Die größte Dicke der Schicht, bis zu der die Interferenzen noch sichtbar sind, kann daher als ein Maß für die Homogenität des einfallenden Lichtes verwendet werden.

Für die vollständige Berechnung dieser Erscheinung kommt zunächst in Betracht, daß die Wegdifferenz zwischen benachbarten Teilstrahlen hier wieder gleich $2d\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}$ ist, wo α der Einfallswinkel, n der Brechungsindex und d die Dicke der Schicht ist. Die Phasendifferenz in Wellenlängen erhalten wir, wenn wir diesen Ausdruck durch die Wellenlänge des Lichtes in der Schicht dividieren. Diese Phasendifferenz mag mit δ bezeichnet werden. Es muß dann weiter berücksichtigt werden, daß die Interferenz die Summenwirkung einer großen Anzahl von Teilstrahlen ist, und es müssen daher noch die Intensitätsverhältnisse aller dieser Strahlen berücksichtigt werden. Wird die Amplitude des einfallenden Strahls mit a bezeichnet (seine Intensität also mit a^2), so teilt sich der Strahl bei jedem Uebergang über die Grenzen der Schicht in einen reflektierten und einen gebrochenen. Die Amplituden dieser Strahlen seien ar und ad. Dann sind die Amplituden der zur Interferenz gelangenden Strahlen der Reihe nach ad^2, ad^2r^2, ad^2r^4, ad^2r^6 usw. und ihre Phasendifferenzen gegenüber dem ersten Strahl sind o, δ, 2δ, 3δ usw. Die einzelnen Strahlen lassen sich daher der Reihe nach durch Gleichungen der folgenden Form darstellen

$$y_1 = ad^2\sin(\vartheta + 2\pi\delta)$$
$$y_2 = ad^2r^2\sin(\vartheta + 4\pi\delta)$$
$$y_3 = ad^2r^4\sin(\vartheta + 6\pi\delta)$$
$$y_4 = ad^2r^6\sin(\vartheta + 8\pi\delta) \text{ usw.}$$

Diese Gleichungen sind zu summieren um die Gleichung des resultierenden Strahls zu erhalten. Das Quadrat der Amplitude dieses resultierenden Strahls ergibt dann die Intensität des

Interferenzlichtes für diese Strahlrichtung. Man erhält so als resultierende Intensität

$$A^2 = a^2(1-r^2)^2 \frac{(1-r^{2m})^2 + 4r^{2m}\sin^2 m\pi\delta}{(1-r^2)^2 + 4r^2\sin^2\pi\delta}$$

Hier bedeutet m die Anzahl der zur Interferenz kommenden Teilstrahlen. Kann man diese Anzahl als sehr groß ansehen ($m = \infty$), so vereinfacht sich der Ausdruck in

$$A^2 = \frac{a^2(1-r^2)^2}{(1-r^2)^2 + 4r^2\sin^2\pi\delta}$$

Eine ganz analoge Berechnung läßt sich auch für die Erscheinung im reflektierten Licht durchführen; es wird dann erhalten

$$A_1^2 = \frac{4a^2r^2\sin^2\pi\delta}{(1-r^2)^2 + 4r^2\sin^2\pi\delta}.$$

Aus diesen Formeln entnehmen wir leicht, welches die maximalen und minimalen Helligkeiten im Interferenzbilde sind. Für durchfallendes Licht erhalten wir das Maximum, wenn δ eine ganze Zahl ist. Dann wird $A^2 = a^2$, d. h. die hellen Ringe im Bilde haben die volle Helligkeit des einfallenden Lichtes. Das Minimum liegt stets dort, wo die Zahl δ um $1/2$ größer ist als im Maximum. Dann wird $A^2 = a^2\left(\frac{1-r^2}{1+r^2}\right)^2$. In den dunklen Ringen tritt also keine völlige Dunkelheit ein; die Gesamtheit des durchdringenden Lichtes wird also an diesen Stellen durch Interferenz nicht völlig ausgelöscht.

Im reflektierten Licht tritt das Minimum dann ein, wenn δ eine ganze Zahl ist. Hier wird $A_1^2 = 0$. Im reflektierten Licht sind also die dunklen Ringe völlig lichtlos. Das Maximum tritt ein wenn δ um $1/2$ größer als im Minimum ist; dann wird $A_1^2 = \frac{4a^2r^2}{(1+r^2)^2}$. Die Helligkeit der hellen Streifen bleibt im reflektierten Licht also stets etwas hinter der Intensität des direkten Lichtes zurück.

Besonders bemerkenswert wird die Interferenzerscheinung, wenn das Reflexionsvermögen der Schicht sehr vollkommen ist, also r sehr nahe gleich Eins ist. Dann wird zunächst sowohl für durchfallendes wie für reflektiertes Licht das Maximum der Helligkeit der Interferenzringe gleich a^2 und das Minimum gleich 0. Ferner sieht man aus der Formel für A^2, daß die Intensität überall gelich Null ist, solange $\sin \pi\delta$ noch merkliche, endliche Werte hat. Erst wenn $\sin \pi\delta$ selbst zu Null wird, wächst der Wert von A^2 schnell zu a^2 an. Wir haben dann also im durchfallenden Licht sehr feine helle Streifen auf vollkommen dunklem Grunde. Für reflektiertes Licht zeigt die Formel für A_1^2, daß wir dann sehr scharfe dunkle Linien auf hellem Grunde erhalten müssen.

4b) Experimentelle Verwirklichung. Die Interferenzen gleicher Neigung wurden zuerst von Haidinger an Glimmerplatten beobachtet, dann wurden sie unabhängig wiedergefunden von Mascart und von Lummer und von letzterem eingehend untersucht und erklärt. Sie sind leicht an jeder gut planparallelen Glasplatte zu beobachten, wenn man mit auf Unendlich eingestelltem Auge durch sie hindurch nach einer breiten Natriumflamme hinblickt. Noch deutlicher sieht man das Ringsystem im reflektierten Licht, wenn man durch Vermittelung einer zweiten Glasplatte für senkrechten Einfall des Lichtes nach Figur 20 sorgt, wo L die ausgedehnte

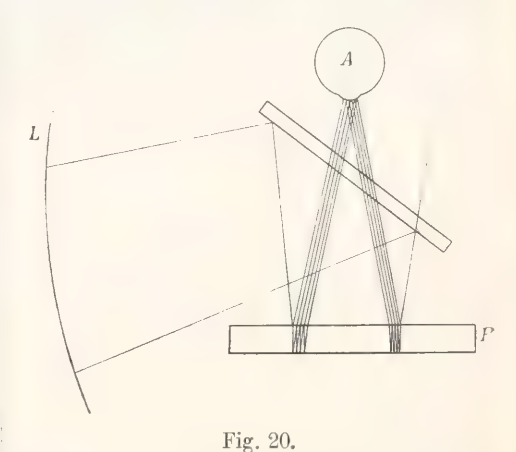


Fig. 20.

Lichtquelle, A das Auge und P die planparallele Platte bedeutet. Ist die Platte vollkommen gleich dick an allen Stellen, so bleibt das Ringsystem bei Bewegung der Platte in ihrer eigenen Ebene vollkommen unverändert. Ist sie ganz schwach keilförmig, so quellen, wenn die Platte so bewegt wird, daß immer dünnere Teile der Platte in die Mitte des Sehfeldes gelangen, immer neue Ringe aus dem Zentrum des Bildes heraus; die Ringe drängen nach außen auseinander. Jeder Uebergang der Mitte von Dunkelheit über Helligkeit bis wieder zur Dunkelheit entspricht einem Dickenunterschied in der Platte von $\frac{\lambda}{2}$. Diese Beobachtungsmethode liefert daher ein sehr empfindliches Mittel, um die Genauigkeit planparalleler Platten zu prüfen. Ein handlicher, nach Lummers Angaben hergestellter Apparat wird von der Firma Zeiß für diese Zwecke hergestellt.

Blickt man schräg auf die planparallele Platte, so bleibt die Interferenzerscheinung auch noch sichtbar, aber man sieht dann nicht mehr die Mitte des Ringsystems, sondern einen seitlichen Teil, der dann nur ein System paralleler Interferenzlinien zeigt, die bei sehr schrägem Lichteinfall schließlich geradlinig erscheinen. Dies hat Lummer zu einer sehr sinnreichen Anwendung dieser Erscheinung, in der Lummerschen Interferenzplatte, geführt. Läßt man das Licht auf eine ausgedehnte, sehr gute Planplatte so schräg auffallen, daß im Innern der Platte nahezu der Grenzwinkel der Totalreflexion erreicht ist, dann wird das Reflexionsvermögen r

sehr nahe gleich 1, zugleich werden die inneren Reflexionen sehr zahlreich (vgl. Fig. 21). Beide Bedingungen wirken dahin zusammen, daß außerordentlich feine, scharfe Interferenzlinien entstehen, die in einem auf Unendlich eingestellten Fernrohr sichtbar werden. Es würden zunächst im reflektierten Licht dunkle Streifen auf hellem Grunde im durchtretenden Licht das Entgegengesetzte entstehen.

Es zeigt sich nun weiter, wenn man die Berechnung der Helligkeit der Streifen im reflektierten Licht vollständig ausführt, daß die Formeln für die Einzelstrahlen auf der reflektierenden Seite mit denen auf der anderen Seite völlig übereinstimmen, nur daß auf der reflektierenden Seite noch der erste gar nicht in die Platte eingedrungene Strahl hinzukommt. Unterdrücken wir diesen, indem wir ein kleines Prisma vorn auf die Platte aufkitten (Fig. 21), so müssen die Interferenzen auf beiden Seiten der Platte auch ganz identisch werden. In der Tat erhält man dann beiderseits helle Streifen auf dunklem Grunde und kann die Beobachtungen von beiden Seiten der Platte mit einem auf Unendlich eingestellten Fernrohr in genau gleicher Weise erhalten (Fig. 21).

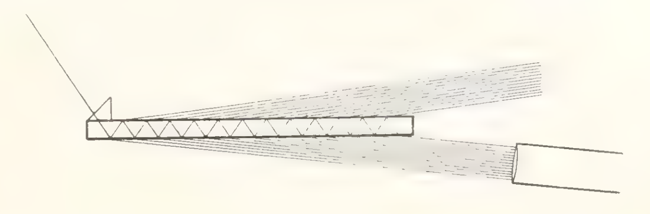


Fig. 21.

In dieser Form gestattet die Versuchsanordnung eine außerordentliche empfindliche Prüfung einer Lichtmasse, z. B. des Lichtes einer Spektrallinie, daraufhin, ob sie tatsächlich nur Licht einer Wellenlänge enthält, oder ob sie noch ein Gemisch verschiedener sehr wenig voneinander abweichender Wellenlängen ist. Für jede Wellenlänge entsteht ein scharfes Streifensystem und für eine etwas abweichende Wellenlänge müssen die Streifen an anderer Stelle liegen. Besteht also eine Spektrallinie in Wirklichkeit aus mehreren Einzellinien, die aber im Spektroskop nicht voneinander zu trennen sind, so wird doch die mit der Lummerschen Interferenzplatte zu beobachtende Erscheinung die Interferenzstreifen für die einzelne Wellenlänge nebeneinander zeigen. Die feinsten Zerlegungen einer Spektrallinie durch ein magnetisches Feld, Zeemaneffekt (vgl. den Artikel „Magnetooptik") werden auf diese Weise durch die Interferenzplatte sichtbar gemacht.

Eine andere Anwendungsweise der Interferenzen gleicher Neigung findet sich in dem Interferometer von Fabry und Perot. Dieses besteht aus zwei einander genau parallel gegenübergestellten Glasplatten, deren einander zugekehrte Seiten mit einer halbdurchlässigen Silberschicht überzogen sind. Der Luftraum zwischen diesen Silberflächen ist in diesem Falle die planparallele Schicht, durch welche mit einem auf Unendlich eingestellten Fernrohr das Ringsystem gesehen wird. Infolge der Versilberung ist der Reflexionskoeffizient sehr groß gemacht, und dadurch wird das Streifensystem sehr scharf. Kennt man die Dicke der Luftschicht und die Brennweite des Fernrohrobjektivs, so kann man durch Messen der Durchmesser der Interferenzringe die Wellenlänge des homogenen Lichtes, das die Interferenzerscheinung erzeugt, sehr genau bestimmen. Eicht man den Apparat mit Licht, dessen Wellenlänge sehr genau bekannt ist, z. B. den drei Hauptlinien des Cadmiumlichtes, so kann man das Licht irgendeiner anderen Spektrallinie sehr genau auf diese Cadmiumlinien beziehen. Der Apparat ist um so genauer, je größer die Dicke der wirksamen Luftschicht gewählt wird. Auch zum Erkennen, ob eine Spektrallinie homogen oder unterteilt ist, kann der Apparat in gleicher Weise wie die Lummersche Platte verwendet werden.

Eine sehr wichtige Anwendung der Interferenzen gleicher Neigung hat ferner Michelson mit seinem bereits im vorigen Abschnitt beschriebenen Interferometer gemacht. Stellt man die Platte S_2 dieses Apparates (siehe Fig. 14) so auf, daß ihr Spiegelbild S'_2 genau parallel mit S_1 wird, so stellt S'_2S_1 jetzt die planparallele Schicht dar. In dem jetzt auf Unendlich einzustellenden Fernrohr wird daher bei Anwendung homogenen Lichtes das Ringsystem der Interferenzen gleicher Neigung sichtbar. Wird dann S_2 parallel mit sich selbst verschoben, so daß S'_2 von S_1 fortrückt, so schrumpft das Ringsystem nach der Mitte hin zusammen; fixiert man einen seitlichen Punkt, so wandert bei der Verschiebung von S_2 ein Interferenzstreifen nach dem anderen an diesem Punkt vorüber, und die Größe der Verschiebung kann aus der Zahl der vorübergezogenen Interferenzstreifen bis auf Bruchteile von Wellenlängen genau gemessen werden. Jetzt setzte Michelson einen der mit zwei Spiegeln versehenen Maßstäbe (Fig. 15) an die Stelle neben S_1, so daß die Interferenzen sowohl an den Spiegeln dieses Maßstabes wie an S_1 gesehen wer werden konnten, und brachte S'_2 zunächst mit dem vorderen Spiegel dieses Maßstabes zur Deckung, was durch die Newtonschen

Streifen im weißen Licht kontrolliert wurde. Dann verschob er S'_2 bis zur Deckung mit dem hinteren Spiegel dieses Maßstabes und maß die Größe der Verschiebung durch Auszählung der vorüberziehenden Interferenzringe gleicher Neigung, die durch homogenes Licht zwischen S'_2S_1 erzeugt wurden. Dadurch erhielt er bis auf Bruchteile von Wellenlängen genau die Größe dieses ersten Maßstabes, der eine Länge von etwa ½ mm hatte, und 1212,37 Wellenlängen umfaßte. Dieser Maßstab wurde nach der bereits oben beschriebenen Methode mittels Newtonscher Streifen mit einem doppelt so langen verglichen, der wieder mit einem doppelt so langen und so fort, bis die Länge eines ganzen Meter erreicht war. Dadurch gelang es, die Länge den Normalmeter genau in Lichtwellenlängen auszudrücken. Die Untersuchung wurde mit der roten, grünen und blauen Cadmiumlinie ausgeführt und ergab, daß ein Meter gleich war 1 553 163,5 Wellenlängen des roten, 1 996 249,7 Wellenlängen des grünen, 2 083 372,1 Wellenlängen des blauen Cadmiumlichtes.

Einen besonderen Fall von Interferenzen gleicher Neigung stellen schließlich noch die Herschelschen Streifen dar. Diese werden sichtbar, wenn man zwei rechtwinkelige Glasprismen mit ihren Hypothenusenflächen so einander gegenüberstellt, daß sie eine planparallele Luftschicht zwischen sich lassen (Fig. 22). Die so erhaltene Luftplatte muß natürlich, soweit sie überhaupt

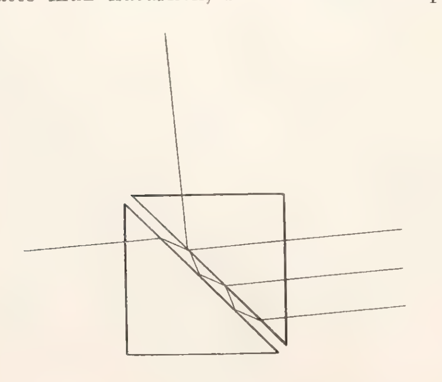


Fig. 22.

lichtdurchlässig ist, d. i. bis zur Grenze der Totalreflexion hin, sowohl im reflektierten wie im durchgehenden Lichte die Interferenzkurven gleicher Neigung zeigen, die in einem auf Unendlich eingestellten Fernrohr in homogenem Licht sichtbar werden. Nahe der Grenze der Totalreflexion treffen bei dieser Anordnung aber noch zwei besonders günstige Umstände zusammen, so daß sie hier besonders leicht bemerkbar werden. Zunächst wird hier das Reflexionsvermögen sehr groß und infolgedessen werden die Streifen, wie oben bereits abgeleitet wurde, sehr scharf. Außerdem aber werden sie hier sogar achromatisch. Dies rührt daher, daß die Grenze der Totalreflexion für die verschiedenen Farben bei verschiedenen Einfallswinkeln liegt. Stellt daher in Figur 23

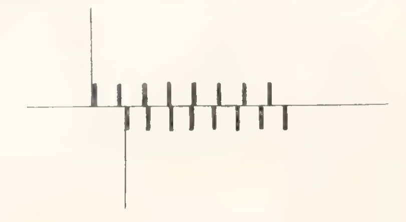


Fig. 23.

die obere Reihe einen Ausschnitt aus den Interferenzstreifen in rotem Lichte dar, die bis an die links angegebene Grenze der Totalreflexion heranreichen und nach hierhin immer schärfer werden, so ordnen sich über diese die Streifen des blauen Lichtes so wie die untere Reihe angibt. Die blauen Streifen sind enger, aber zugleich ist die Grenze, bis zu der sie reichen, nach rechts hin gerückt. Dadurch entsteht unweit der Grenze ein schmales Gebiet, wo die Streifen aller Farben sich gut achromatisch übereinander lagern. Das heißt aber, daß in diesem Falle die Interferenzen schon im weißen Lichte sichtbar werden. Macht man die Luftplatte sehr dünn, indem man die Prismen mit ihren Hypothenusenflächen direkt aneinander legt, so sind die Streifen auch schon ohne genaue Akkommodation auf Unendlich leicht zu finden; in dieser Form wurden sie zuerst von Herschel entdeckt.

Von diesen Herschelschen Streifen hat Lummer eine sehr sinnreiche Anwendung in seinem Interferenzphotometer gemacht. Blickt man nämlich mit einem Fernrohr durch diese Prismenkombination nach einer fernen hellen Fläche, so sieht man die scharfen Herschelschen Streifen. Stellt man seitlich in der Richtung der reflektierten Strahlen eine helle Fläche auf, so müssen auch auf dieser die Herschelschen Streifen erscheinen. Da aber die Streifen im reflektierten Licht komplementär zu den direkt gesehenen sind, so werden die beiden Streifensysteme sich vollständig aufheben, also unsichtbar werden, sobald beide Flächen gleich hell sind. Ist die seitliche Fläche in meßbar veränderlicher Weise beleuchtet, so kann man hierdurch jede einzelne Stelle einer fernen hellen Fläche, z. B. einer Wolke, photometrisch ausmessen.

Da die Interferenzkurven gleicher Neigung theoretisch bis zu beliebig großer Dicke der wirksamen Schicht auftreten sollten, so sind

sie besonders geeignet zur Prüfung der Frage, bis zu welcher Ausdehnung kohärente Lichtstrahlen miteinander interferenzfähig bleiben. Unmittelbar nachprüfen kann man diese Frage mit dem Interferometer von Michelson; man braucht nur den beweglichen Spiegel S_2 dieses Instrumentes (Fig. 14) immer weiter zu verschieben in einer Stellung, deren Spiegelbild S'_2 genau parallel mit S_1 ist, und zu beobachten, wie lange noch Interferenzringe gleicher Neigung sichtbar bleiben. Auf die Weise konnte Michelson beim grünen Quecksilberlicht Interferenzen noch auf Längen von nahezu 800 000 Wellenlängen entsprechend ½ m Luftstrecke nachweisen. Aber diese Zahl stellt noch nicht die äußerste Grenze für die Interferenzfähigkeit des Lichtes dar, denn bei der Michelsonschen Anordnung muß schließlich ein Verschwinden der Interferenzen immer eintreten, sobald das verwendete Licht, die Spektrallinie, nicht vollkommen aus Licht einer einzigen Wellenlänge besteht, sondern sobald die Spektrallinie eine gewisse Breite hat. Aus dem abwechselnden Deutlicher- und Schwächerwerden der Interferenzen und dem schließlichen Abklingen bei Verschieben des Spiegels S_2 konnte Michelson wichtige Schlüsse auf die Zusammengesetztheit und die Breite der Spektrallinie ziehen, denn im Interferenzbilde spielt sich hierbei ein stetiges Durcheinanderschieben der Ringsysteme für die verschiedenen Teile der Spektrallinie ab.

Noch weiter hinaus ist die Interferenzfähigkeit des Lichtes von Lummer beobachtet worden. Lummer wählte als planparallele Schicht eine Glasplatte von 6 cm Dicke, die auf der einen Seite halbdurchlässig versilbert war und auf der anderen undurchlässig versilbert. In der letzteren war an einer Stelle (a in Fig. 24) ein spaltförmiger Streifen für den Lichteintritt freigelassen. In einem auf Unendlich eingestellten Fernrohr wurden dann die Interferenzen gleicher Neigung gesehen. Nach der Theorie müssen diese Interferenzstreifen um so schärfer werden, je größer das Reflexionsvermögen der Platte, aber auch je größer die Zahl der zur Interferenz gelangenden Teilstrahlen ist. Der ersten Bedingung war durch die Versilberung genügt und dadurch erreicht, daß das grüne Quecksilberlicht 4 verschiedene gut getrennte feine Streifensysteme zeigte. Jetzt konnten von den einzelnen Teilstrahlen (1, 2, 3, 4, usw. der Fig. 24) beliebig viele abgeblendet werden; je mehr Teilstrahlen durchgelassen wurden, desto schärfer mußten theoretisch die Interferenzstreifen werden. Es konnte in der Tat beobachtet werden, daß bis zur Zulassung von 9 Teilstrahlen die Schärfe der Interferenz noch zunahm. Zwischen dem 1. und 9. Strahl besteht aber ein Unterschied in der Weglänge von 16 mal der Dicke der Platte, also 16.6 = 96 cm im Glas, was einer Strecke von 144 cm in Luft entsprechen würde, also noch fast das Dreifache von dem, was Michelson erkennen konnte. Damit ist die Interferenzfähigkeit des grünen Quecksilberlichtes bis auf wenigstens 2½ Millionen Wellenlänge sichergestellt.

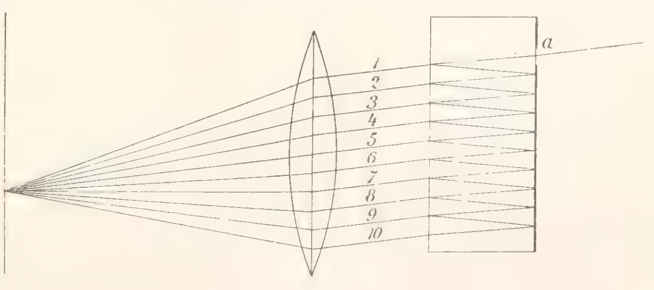


Fig. 24.

5. Interferenzen an zwei dicken Platten. Eine den Interferenzen gleicher Neigung entsprechende Erscheinung sind die

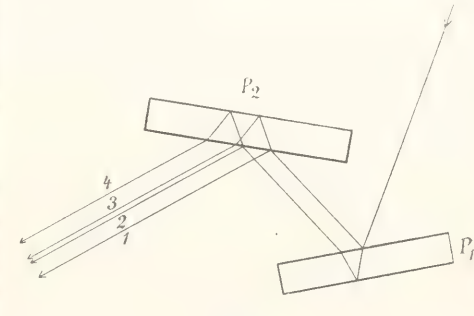


Fig. 25.

Interferenzen, die von Brewster zuerst an zwei Glasplatten beobachtet wurden. Hat man zwei Glasplatten, die selbst planparallel sein müssen, und wird ein Lichtstrahl von beiden reflektiert (Fig. 25), so teilt er sich an der ersten Platte in zwei Teile und jeder von diesen wird von der zweiten Platte noch einmal geteilt, so daß vier Teilstrahlen 1, 2, 3, 4 entstehen. Diese sind untereinander parallel und je zwei von ihnen müssen daher in einem auf Unendlich eingestellten Fernrohr in homogenem Licht Interferenzen geben, genau wie bei den Kurven gleicher Neigung. In der Tat bekommt man auch auf diese Weise mehrere verschiedene Interferenzsysteme zu sehen; unter diesen

zeichnet sich aber eines durch große Streifenbreite und leichte Sichtbarkeit aus, da es durch Interferenzen von nur geringen Gangunterschieden hervorgerufen wird, das sind die durch die Strahlen 2 und 3 erzeugten Interferenzen, da jeder von diesen Strahlen nur in das Innere der einen von beiden Platten eingedrungen, von der anderen aber gleich an der Oberfläche reflektiert ist. Sind beide Platten gleich dick (aus einem Stück geschnitten), der Winkel zwischen ihnen nur sehr klein und wird ein nahezu senkrechter Strahleneinfall beobachtet, so wird die Gangdifferenz in den Strahlen 2 und 3 an einer Stelle geradezu Null. In der Umgebung dieser Stelle werden daher die Streifen achromatisch und daher schon in weißem Lichte sichtbar. In dieser Form wurden sie zuerst von Brewster beobachtet und als Brewstersche Streifen bekannt. Um sie zu sehen, blicke man durch zwei planparallele, gleich dicke Glasplatten in der Stellung der Figur 26

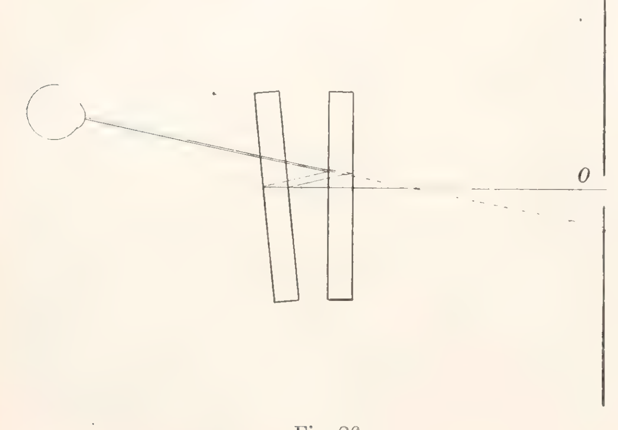


Fig. 26.

nach der Oeffnung o in einen Schirm; das doppelt reflektierte Licht projiziert sich dann durch die schwache Neigung der einen Platte neben die helle Oeffnung des Schirmes und in diesem werden die Streifen sichtbar.

Verfolgt man rechnerisch die Größe des Gangunterschiedes in den Teilstrahlen 2 und 3 für die verschiedenen Neigungswinkel der Platten und Strahlrichtungen, so gilt, wie bereits oben wiederholt benutzt, als Gangunterschied zwischen den beiden an einer einzelnen Platte erzeugten Teilstrahlen der Wert $2d\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}$, wo d die Dicke, n der Brechungsindex der Platte und α der Einfallswinkel ist. Bei gleich dicken Platten muß daher zwischen den Strahlen 2 und 3 ein Gangunterschied bestehen von der Größe $\delta = 2d(\sqrt{n^2-\sin^2\alpha_1} - \sqrt{n^2-\sin^2\alpha_2})$ wo α_1 und α_2 die beiden ungleichen Einfallswinkel an den beiden Platten sind. Der Neigungswinkel zwischen den beiden Platten sei 2β. Figur 27 möge dann eine Ebene senkrecht zur Schnittlinie der Platten sein, in der also der Neigungswinkel zu messen ist. Ziehen wir dann die Halbierungslinie des Neigungswinkels und zu ihr die Senkrechte OM,

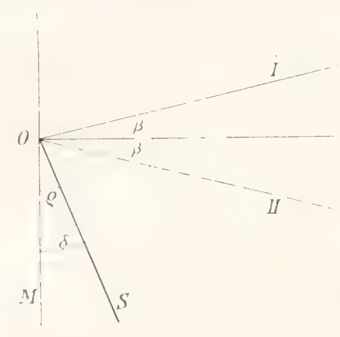


Fig. 27.

dann ist die Richtung des zwischen den Platten liegenden Strahlabschnittes bestimmt, wenn wir durch O eine Parallele OS zu diesem Strahlabschnitt ziehen, (wobei OS aber aus der Ebene der Figur 27 im allgemeinen heraustreten wird) und den Winkel SOM = ϱ, sowie den Neigungswinkel δ der Ebene SOM gegen die Ebene der Figur bestimmen. Nach der Berechnung von Ketteler gelten dann die Beziehungen

$\cos\alpha_1 = \cos\varrho\cos\beta + \sin\varrho\sin\beta\cos\delta$

$\cos\alpha_2 = \cos\varrho\cos\beta - \sin\varrho\sin\beta\cos\delta$

Ersetzen wir jetzt in dem obigen Ausdruck für δ $\sin^2\alpha$ durch $1-\cos^2\alpha$ und ersetzen $\cos\alpha$ durch die eben gefundenen Werte, so sehen wir, daß der Gangunterschied in drei Fällen genau gleich Null werden kann: wenn $\cos\varrho = 0$, $\sin\varrho = 0$ und $\cos\delta = 0$ ist. $\cos\varrho = 0$ ergibt keinen Sinn, da es bedeuten würde, daß der Strahl zwischen den Platten in der Halbierungsebene des Neigungswinkels verläuft.

Die Rechnung zeigt, daß es zwei Fälle gibt, in denen die Streifen achromatisch sind. Der erste Fall, $\sin\varrho = 0$, tritt ein, wenn der Strahl zwischen den Platten senkrecht zur Halbierungsebene des Neigungswinkels verläuft. Diese Blickrichtung ist es auch, in welcher man bei der einfachen Brewsterschen Anordnung die Streifen sieht. Diese Streifen lassen sich, wie Lummer gezeigt hat, aber auch bis zum beliebig großen Plattenwinkel β verfolgen, wenn nur immer der Strahl zwischen den Platten senkrecht zur Halbierungsebene des Plattenwinkels steht. Man beobachtet dann stets ein System schon in weißem Lichte sichtbarer Streifen; freilich muß man bei größeren Plattenwinkeln ein Fernrohr zu Hilfe nehmen, denn wie Figur 28 zeigt, rücken bei größerem Platten-

winkel die Strahlen 2 und 3 so weit auseinander, daß sie nicht mehr gleichzeitig von dem auf Unendlich akkommodierten Auge aufgenommen werden können.

Der zweite Fall, in dem der Grenzunterschied zwischen den Strahlen 2 und 3 gleich Null, also die Interferenzen in weißem Lichte

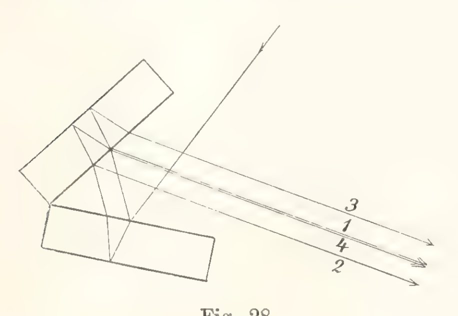


Fig. 28.

sichtbar werden, tritt ein, wenn cos $\delta = 0$ ist. Es verlaufen dann die Lichtstrahlen ganz in einer Ebene senkrecht zur Ebene des Neigungswinkels der Platten; innerhalb dieser Ebene kann aber der Einfallswinkel ein ganz beliebiger sein. Wir können daher jetzt die Platten weit auseinander rücken und erhalten den Strahlengang, wie er in Figur 29 gezeichnet ist. Hier ist die Ebene der Figur die senkrecht zum Neigungswinkel der Platte

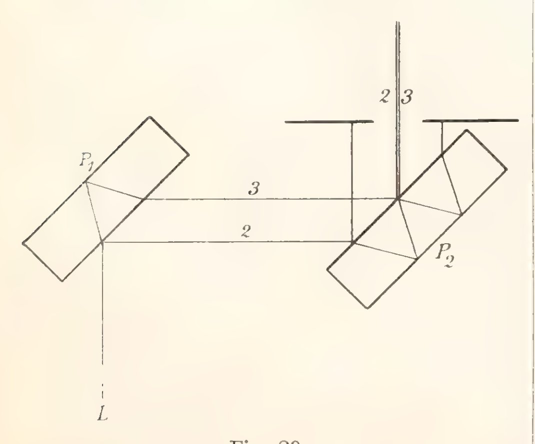


Fig. 29.

gelegte Ebene. Die Platten I und II sind mit ihrer Durchschnittsfigur durch diese Ebene gezeichnet; sie selbst sind beide ein wenig, aber entgegengesetzt gleich weit gegen die Figurebene geneigt. Der Vergleich dieser Figur mit der Figur 9 dieses Abschnittes zeigt uns dann aber noch einen weiteren Vorzug dieser Aufstellung, denn wir erhalten in der Tat genau den gleichen Strahlengang wie dort. Das heißt aber, daß die Streifen jetzt nicht nur in der Unendlichkeit beobachtet werden können, sondern schon als Fresnelsche Streifen im ganzen Raum auftreten und ganz ohne Linse auf einem weißen Schirm aufgefangen werden können. Ein weiterer Vorzug dieser Aufstellung liegt darin, daß die zur Interferenz beitragenden Strahlen 2 und 3 nach Verlassen der zweiten Platte dicht beieinander liegen, während die störenden Strahlen 1 und 4 in merklichen Abständen seitlich davon liegen und daher leicht abgeblendet werden können; dadurch wird die Erscheinung besonders scharf sichtbar.

Diesen Aufbau zweier Platten hat Jamin in seinem Interferentialrefraktor benutzt, um sehr geringe Verschiedenheiten im Brechungsindex zweier Medien zu messen. Da die beiden wirksamen Strahlen 2 und 3 bei dieser Anordnung zwischen den beiden Platten weit auseinander liegen, so ist es möglich, hier in den Gang dieser beiden Strahlen verschiedene Substanzen einzuschalten. Jeder noch so geringe Unterschied im Brechungsindex der beiden Substanzen muß sich dann in einer Verschiebung des Streifensystems bemerkbar machen, da ja dieser Unterschied gleichbedeutend ist mit einer ungleichen Zahl von Wellenlängen innerhalb der im übrigen gleich langen Abschnitte der eingeschalteten Substanzen. Von Ketteler wurden auf diese Weise genaue Messungen der Farbenzerstreuung verschiedener Gase ausgeführt. Zehnder und Mach haben den Jaminschen Interferentialrefraktor noch weiter vervollkommnet, indem sie die wirksamen Strahlen zwischen den Reflexionen noch wesentlich weiter auseinander führten; es entstand so der Strahlengang der Figur 30. Es sind hier

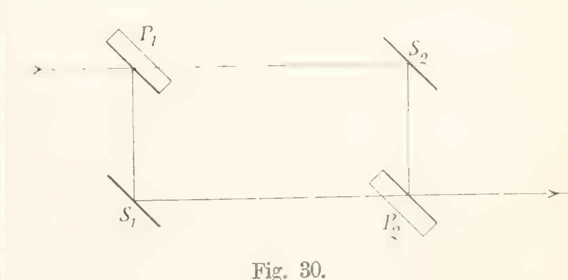


Fig. 30.

P_1 und P_2 halbdurchlässig versilberte Platten und S_1 und S_2 undurchsichtige Spiegel. Es mag schließlich noch bemerkt werden, daß es nicht notwendig ist, beim Jaminschen Interferentialrefraktor auf die bei horizontalem Strahlengang auch horizontal liegenden achromatischen Streifen einzustellen. Da man doch meist mit Fernrohr und monachromatischem Licht arbeiten wird, wegen der größeren Reinheit der monochromatischen Streifen, kann man dem Neigungswinkel der Platten auch jede beliebige andere Lage geben.

Solange dieser nur klein ist, erhält man nach dem Prinzip der Kurven gleicher Neigung stets sehr leicht Interferenzstreifen (nahezu gerade Abschnitte von elliptischen Kurven), die der Schnittlinie der Platten parallel verlaufen.

6. Stehende Lichtwellen. Eine ganz andere Art von Interferenzerscheinungen kann schließlich noch dadurch zustande kommen, daß ein System von Lichtwellen durch eine ihnen senkrecht entgegengestellte spiegelnde Fläche in sich selbst zurückgeworfen wird, so daß die ankommenden und zurückgeworfenen Wellen einander genau entgegengesetzt verlaufen. Unter diesen Verhältnissen erzeugen beide Wellensysteme durch Interferenz die Erscheinung, die wir als stehende Wellen kennen (vgl. den Artikel „Welleninterferenz"). In festen Abständen von der Größe einer halben Wellenlänge von der reflektierenden Wand entfernt bilden sich Schwingungsknoten, Stellen geringster Bewegung der schwingenden Substanz, und dazwischen Schwingungsbäuche. Auch diese Erscheinung hat sich mittels Lichtwellen hervorrufen lassen, wie Wiener gezeigt hat. Da die Wellenlänge des Lichtes sehr klein ist, benutzte Wiener einen Kunstgriff, um trotzdem die einzelnen Flächen, in denen die Schwingungsknoten liegen, getrennt nachweisen zu können. Ein Bündel parallelen, einfarbigen Lichtes fiel senkrecht auf einen ebenen Silberspiegel (Sp in Fig. 31). Vor diesem Spiegel wird, ihn mit einer Kante berührend, eine photographische Platte mit der Schichtseite dem Spiegel zugekehrt unter sehr geringem Neigungswinkel aufgestellt. Die lichtempfindliche Schicht dieser Platte war besonders hergestellt, denn sie mußte vollkommen klar durchsichtig und äußerst dünn sein. Vor dem Spiegel Sp bildeten sich dann, in der Figur 31 durch die feinen Linien angedeutet, Flächen von Schwingungsknoten der Wellenbewegung. Diese Flächen, die selbst nur sehr wenig voneinander abstanden, schnitten dann die photographische Schicht in Linien von merklichen Abständen. Wenn nun die chemische Wirkung in der Schicht in den Schwingungsknoten eine andere war wie in den Schwingungsbäuchen, so mußten in der Schicht Streifen entstehen, deren Abstände gemessen werden konnten. Der Versuch bestätigte in der Tat, daß vor dem Spiegel Sp in Abständen von einer viertel Wellenlänge des wirksamen Lichtes Ebenen von gesteigerter photographischer Wirkung abwechselten mit solchen, in denen eine Wirkung ausblieb. Die Existenz stehender Lichtwellen war damit bewiesen, und es konnte zugleich erkannt werden, daß in der Ebene des Spiegels eine Zone liegt, in der photographische Wirkung nicht eintritt; die erste Schicht, in der Silber niedergeschlagen ist, liegt $^1/_4\ \lambda$ vor dem Spiegel, dann folgen die Schichten in Abständen von $\frac{1}{2}\ \lambda$.



Fig. 31.

Auch bei schrägem Lichteinfall und polarisiertem Licht ließen sich die stehenden Lichtwellen in gleicher Weise nachweisen, und zwar mußte die Polarisationsebene des Lichtes (vgl. den Artikel „Lichtpolarisation") in der Einfallsebene liegen; lag die Polarisationsebene senkrecht zur Einfallsebene, so traten keine Streifen in der photographischen Schicht auf. Da Interferenzen immer nur dann eintreten können, wenn die Schwingungsrichtungen der beiden zusammentreffenden Wellenzüge einander parallel sind, so muß hieraus geschlossen werden, daß die Schwingungsrichtung der Lichtbewegung, die die photographische Wirkung hervorruft, senkrecht zur Polarisationsebene des Lichtes liegt. Fassen wir das Licht nach der elektromagnetischen Theorie als ein System elektromagnetischer Wellen auf (vgl. im Artikel „Lichtpolarisation" die Fresnelschen Gleichungen), so würde aus diesen Versuchen folgen, daß die photochemische Wirkung und ebenso die Fluoreszenzwirkung, denn an Stelle der photographischen Schicht kann auch eine Fluoreszenzschicht gesetzt werden, durch den elektrischen Vektor der Wellen bestimmt ist. Da der elektrische Vektor nach dieser Theorie in der reflektierenden metallischen Fläche einen Schwingungsknoten hat, so muß man aus dem ersten Versuch weiter schließen, daß die photographische und Fluoreszenzwirkung in den Schwingungsbäuchen der elektrischen Kraft entsteht, d. h. dort, wo maximale elektrische Kräfte rasch wechselnder Richtung auftreten.

Von den stehenden Lichtwellen wird eine interessante Anwendung in der Farbenphotographie von Lippmann gemacht. Dieser verwendet eine ganz klare photographische Schicht auf einer Glasplatte; bei der Aufnahme befindet sich jedoch die Platte in einer Kassette in solcher Lage, daß das ankommende Licht erst die Glasplatte durchsetzt und dann erst die photographische Schicht erreicht. Die Platte ist dann mit Quecksilber hintergossen, so daß das Licht unmittelbar von der Oberfläche der photographischen Schicht in sich selbst reflektiert wird. Offenbar müssen unter diesen Verhältnissen die stehenden Lichtwellen inner-

halb der photographischen Schicht zustande kommen. Neuhaus ist es gelungen, in einem Querschnitt durch die Schicht einer Lippmannphotographie mit dem Mikroskop tatsächlich das Vorhandensein lamellarer Silberniederschläge in Abständen von einer halben Wellenlänge nachzuweisen. Wird eine fertige Lippmannphotographie mit weissem Lichte beleuchtet und das reflektierte Licht beobachtet, so findet an den lamellaren Silberflächen die Reflexion statt. Hatte nun an einer Stelle Belichtung z. B. mit rotem Lichte stattgefunden, so werden die roten Lichtwellen von den verschiedenen Silberlamellen so reflektiert, daß die gemeinsam zurückkehrenden Wellen in ihren Teilen immer gerade um eine ganze Wellenlänge gegeneinander verschoben sind, so daß sie sich also alle gegenseitig verstärken können. Rotes Licht wird also sehr lebhaft reflektiert werden. Für Licht aller anderen Wellenlängen tritt aber ein solches Zusammenwirken aller von den verschiedenen Silberlamellen reflektierten Wellen nicht ein; dies Licht wird daher durch Interferenz größtenteils vernichtet werden. So kommt es, daß die Lippmannphotographien tatsächlich im reflektierten Lichte sehr gut gerade in den Farben gesehen werden, welche bei der Aufnahme auf die Platte gewirkt hatten. Freilich ist dabei Voraussetzung, daß das Licht bei der Beobachtung der Photographie nahe unter dem gleichen Winkel auf die Platte einfallen muß, wie bei der Aufnahme; blickt man unter merklich schrägerem Lichteinfall auf die Platte, so erscheinen alle Farben nach der Seite der größeren Wellenlänge verschoben.

Literatur. ***Chwolson***, *Lehrbuch der Physik Bd. 2, Braunschweig 1905.* — ***Müller-Pouillet***, *Lehrbuch der Physik 9. Aufl., Bd. 2, bearbeitet von* ***O. Lummer***, *Braunschweig 1902.* — ***Winkelmann***, *Handbuch der Physik 2. Aufl., Bd. 6, Leipzig 1908.* — ***Wüllner***, *Experimentalphysik 5. Aufl., Bd. 4, Leipzig 1899.* — ***Drude***, *Lehrbuch der Optik 2. Aufl., Leipzig 1906.* — ***Lummer***, *Wiedemann Ann. Bd. 23 1884, Bd. 24 1885.* — ***Ketteler***, *Beobachtungen über die Farbenzerstreuung der Gase, Bonn 1865.* — ***A. A. Michelson***, *Lichtwellen und ihre Anwendungen Leipzig 1911.* — ***Lummer***, *Verhandl. d. physik. Ges. 3 1901.* — ***Fabry und Perot*** *Ann. chim. et phys. 12 1897, 16 1899, 22 1901, 24 1901, 25 1902.* — ***Wiener***, *Wiedemanns Ann. 40 1890, 55 1895, 69 1899.* — ***Lippmann***, *Journ. de Phys. 3 1894.*

J. Classen.

Lichtpolarisation.

1. Die grundlegenden Erscheinungen. 2. Fresnels Reflexionsgesetze. 3. Zirkulare und elliptische Polarisation. 4. Polarisatoren und Methoden zur Untersuchung polarisierten Lichtes. 5. Drehung der Polarisationsebene. 6. Instrumente zur Messung der Drehung der Polarisationsebene.

1. Die grundlegenden Erscheinungen. Wird Licht von einer polierten Fläche reflektiert, so gelten für das reflektierte Licht die im Artikel „Lichtreflexion" besprochenen beiden Gesetze. In diesen Gesetzen ist noch nicht zum Ausdruck gebracht, in welchem Verhältnis die Intensität des reflektierten Lichtes zu dem des auffallenden bei den verschiedenen Neigungswinkeln steht. Für diese Intensität bestehen aber sehr bemerkenswerte Verschiedenheiten, je nachdem das Licht sogenanntes natürliches Licht ist, wie es z. B. von den weißen Wolken ausgeht, oder schon einmal von einer polierten Fläche gespiegelt ist. Fällt natürliches Licht schräg auf eine Glasplatte, so erhält man reflektiertes Licht, dessen Intensität um einen bestimmten Prozentsatz schwächer ist als das einfallende, und zwar gleichmäßig nach allen Seiten hin, wenn man die Platte um den einfallenden Strahl als Achse dreht. Wird dies Licht von einer zweiten Glasplatte noch einmal unter dem gleichen Einfallswinkel reflektiert und weiter eine Drehung der Glasplatte um den einfallenden Strahl als Achse ausgeführt, so tritt jetzt eine sehr merkliche Intensitätsverschiedenheit der nach den verschiedenen Richtungen reflektierten Strahlen ein. Am größten werden diese Verschiedenheiten, wenn die Reflexion am ersten Spiegel so erfolgte, daß der reflektierte Strahl auf dem in das Glas eindringenden, gebrochenen Strahl senkrecht steht. In diesem Falle wird am zweiten Spiegel gar kein Licht reflektiert, wenn die Einfallsebene an diesem auf der Einfallsebene am ersten Spiegel senkrecht steht; fallen beide Einfallsebenen zusammen, so ist die Intensität des reflektierten Lichtes am größten.

Durch die Reflexion am ersten Spiegel ist hiernach offenbar dem Licht ein besonderer Charakter aufgeprägt, der ihm das verschiedene Verhalten in der Querrichtung zu seiner eigenen Richtung aufzwingt. Wir nennen diesen Zustand des Lichtes seinen Polarisationszustand und sagen: das an der ersten Platte unter den angegebenen Verhältnissen reflektierte Licht ist „in der Einfallsebene polarisiert". Die Erklärung hierfür können wir, wenn wir die Lichtausbreitung als einen Wellenvorgang ansehen, darin finden, daß die Lichtwellen transversal zur Richtung des Strahls schwingen. Fresnel nahm an, daß im polarisierten Licht die Schwingungsrichtung der Teilchen senkrecht zur Polarisationsebene steht, die in diesem Falle gleich der Einfallsebene ist (Fresnelscher Lichtvektor);

N e u m a n n nahm die Schwingungsrichtung in der Einfallsebene liegend an; die elektromagnetische Lichttheorie nimmt eine elektrische Schwingung im Sinne des F r e s n e l - schen Vektors an, die aber stets mit einer magnetischen Schwingung in der Richtung des N e u m a n n schen Vektors verbunden ist. Im Gegensatz zum polarisierten Licht, in dem alle Schwingungen nur in einer Ebene sattfinden, ist anzunehmen, daß im natürlichen Licht keine Polarisationsebene bevorzugt ist, die Schwingungen finden in allen möglichen Transversalrichtungen statt; das natürliche Licht ist als ein gleichmäßiges Gemisch nach allen möglichen Richtungen polarisierter Strahlen anzusehen. Tritt nun die Reflexion unter dem besonderen Winkel ein, daß der reflektierte und der gebrochene Strahl zueinander senkrecht sind, dann ist alles reflektierte Licht polarisiert (**B r e w - s t e r s** Gesetz); ist der Einfallswinkel ein anderer, so findet sich im reflektierten Licht neben dem polarisierten noch natürliches Licht.

Wir können jetzt die Gesetze über die Intensität des reflektierten Lichtes zum Ausdruck bringen, indem wir das einfallende Licht zunächst als vollkommen polarisiert ansehen. Es zeigt sich stets eine Abhängigkeit der reflektierten Intensität von der Größe des Einfallswinkels. Setzen wir die Intensität des einfallenden Lichtes der Einheit gleich, so sind die Intensitätsverhältnisse des reflektierten Lichtes aus der Figur 1 zu entnehmen. Hier bedeuten die

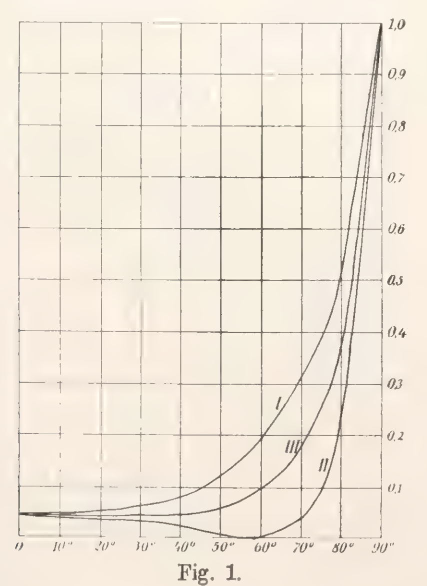


Fig. 1.

Abszissen die Einfallswinkel, die Ordinaten die Intensitäten des reflektierten Lichtes; und zwar entspricht die Kurve I dem Falle, daß das einfallende Licht in der Einfallsebene, die Kurve II, daß es senkrecht zur Einfallsebene polarisiert ist. In der Kurve II sehen wir, daß beim Einfallswinkel 56 ° 40′ (für Glas vom Brechungsindex 1,52) die reflektierte Intensität gleich Null wird; dies entspricht dem oben beschriebenen Fall der zweimaligen Reflexion bei gekreuzter Einfallsebene. Haben wir Licht, das in einer Ebene polarisiert ist, die mit der Einfallsebene den Winkel α bildet, so nennen wir α das Azimut des einfallenden, polarisierten Strahls; dann haben wir uns die Schwingungen des auffallenden Strahls in 2 Komponenten zerlegt zu denken, nach der Einfallsebene und senkrecht dazu. Für diese beiden Komponenten haben wir die zugehörigen reflektierten Intensitäten den Kurven I und II zu entnehmen und erhalten so 2 verschiedene resultierende Intensitäten, aus denen wir die Schwingungen des reflektierten Strahls wieder zusammensetzen. In der Figur stellt die Kurve III die so erhaltene Intensität eines mit dem Azimut 45 ° einfallenden Strahls dar. Das Azimut β des reflektierten Strahls ergibt sich dabei als ein von α verschiedenes; wird ein polarisierter Strahl reflektiert, so tritt demnach außer der Intensitätsänderung eine Drehung der Polarisationsebene ein. Die Größe des Azimuts β ist durch die Kurven der Figur 2 dargestellt für den Fall, daß das Azimut

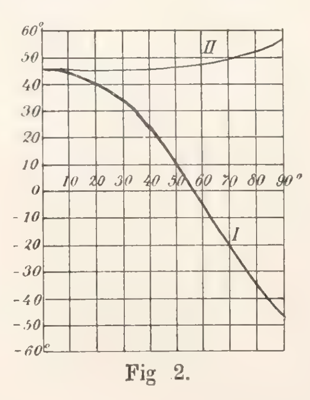


Fig 2.

des einfallenden Strahls $\alpha = 45°$ ist. Es bedeuten hier die Abszissen die Einfallswinkel und die Ordinaten die Werte β. Die Kurve I gilt hier für das reflektierte Licht, die Kurve II für das in das Glas eindringende Licht, das sich ebenfalls in bestimmter Ebene polarisiert erweist.

Ist das einfallende Licht natürliches Licht, so können wir es uns zerlegt denken in 2 gleiche Teile, deren einer in der Einfallsebene, der andere senkrecht dazu polarisiert ist. Das reflektierte Licht besteht dann ebenfalls aus 2 Teilen, die aber jetzt nach den Kurven der Figur 1 ungleiche

Intensität haben. Die kleinere Intensität hat der durch Kurve II dargestellte, senkrecht zur Einfallsebene polarisierte Teil: kombinieren wir ihn mit einem gleich großen Anteil des anderen Teils, so erhalten wir die Menge des natürlichen Lichtes im reflektierten. Es bleibt dann noch ein Rest des zweiten Teils übrig und dieser stellt das polarisierte Licht dar, das dem natürlichen beigemischt ist; die Polarisationsebene desselben liegt in der Einfallsebene.

Die vollständige mathematische Erklärung aller dieser Verhältnisse hat zuerst Fresnel entwickelt, sie wird im folgenden auf Grund der neueren Vorstellungen dargestellt.

2. Fresnels Reflexionsgesetze. a) Ausgangsformeln. Die Erscheinungen der Interferenz des Lichtes insbesondere der Interferenz bei Doppelbrechung führen dazu, das Licht anzusehen als einen periodischen Vorgang, der sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet und der insbesondere durch die Größe eines zur Ausbreitungsrichtung senkrechten Vektors bestimmt ist. Jeder sich mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitende Vorgang muß sich aber darstellen lassen durch eine Funktion von der Form $u = f(t - \frac{r}{v})$, wo t die Zeit, r die Fortpflanzungsrichtung, v die Geschwindigkeit ist. Der Lichtvektor muß daher 3 Komponenten u, v, w haben, die sich in dieser Form darstellen lassen, und weil der Vektor senkrecht zu r stehen soll, so muß $u\frac{x}{r} + v\frac{y}{r} + w\frac{z}{r} = 0$ sein; hieraus kann abgeleitet werden $\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$

Der periodischen Natur des Lichtes tragen wir ferner dadurch Rechnung, daß wir der beliebigen Funktion $f(t - \frac{r}{v})$ die spezielle Form der trigonometrischen Funktion $A \cos \frac{2\pi}{T}(t - \frac{r}{v})$ oder $A \sin \frac{2\pi}{T}(t - \frac{r}{v})$ geben; es bedeutet dann T die Schwingungsdauer der Periode und, wenn wir schreiben $Tv = \lambda$ also $u = A \cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda}\right)$, dann ist λ die Größe, die wir zweckmäßig die Wellenlänge des Lichtes nennen. Durch 3 Funktionen u, v und w von dieser Gestalt lassen sich die Erscheinungen des Lichtes stets darstellen. Die besondere Eigentümlichkeit der trigonometrischen Funktion bringt es nun mit sich, daß ein anderer Vektor L, M, N, der aus u, v, w durch die Beziehung

$$pL = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{dv}{dz};\ pM = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x};$$

$$pN = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}$$

abgeleitet ist, ebenfalls selbst wieder eine Funktion von der gleichen Gestalt ist, wie u, v, w selbst. Das gleiche gilt von einem dritten Vektor von der Gestalt $qX = \frac{1}{v}\frac{du}{dt}$; $qY = \frac{1}{v}\frac{dv}{dt}$; $qZ = \frac{1}{v}\frac{dw}{dt}$; p und q sind Proportionalitätsfaktoren. Die beiden Vektoren L, M, N und X, Y, Z können daher ebensogut wie u, v, w selbst zur Darstellung der Lichtausbreitung benutzt werden; sie sind nur mathematische Umformungen von diesen, und es besteht zwischen ihnen noch die symmetrische Beziehung

$$\frac{p}{qv}\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial M}{\partial z} - \frac{\partial N}{\partial y};\quad \frac{q}{pv}\frac{\partial L}{\partial t} = \frac{\partial Y}{\partial z} - \frac{\partial Z}{\partial y};$$

$$\frac{p}{qv}\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial L}{\partial z};\quad \frac{q}{pv}\frac{\partial M}{\partial t} = \frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{\partial X}{\partial z};$$

$$\frac{p}{qv}\frac{dZ}{dt} = \frac{\partial L}{\partial y} - \frac{\partial M}{\partial x};\quad \frac{q}{pv}\frac{\partial N}{\partial t} = \frac{\partial X}{\partial y} - \frac{\partial Y}{\partial x};$$

und zu diesen kommen noch die beiden Gleichungen:

$$\frac{\partial X}{dx} + \frac{\partial Y}{\partial y} + \frac{\partial Z}{\partial z} = 0 \text{ und } \frac{\partial L}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial y} + \frac{\partial N}{\partial z} = 0$$

Für die Darstellung der Lichtvorgänge würde es völlig gleichgültig sein, welcher dieser Vektoren benutzt wird, insbesondere folgt aus der Symmetrie zwischen den beiden letztgenannten Vektoren, daß, wenn ein Vorgang sich durch X, Y, Z darstellen läßt, dann sich stets ein anderer Vektor L, M, N angeben läßt, der zu jenem senkrecht steht und den Vorgang ebensogut darstellt. In der Auswahl, welche Vektoren wir benutzen wollen, sind wir daher uneingeschränkt und können die Wahl so treffen, daß wir besondere Vorteile damit erreichen. Fresnel wählte den Vektor X, Y, Z als Lichtvektor, Neumann dagegen L, M, N; beide verbanden mit dieser Auswahl bestimmte Vorstellungen von der Elastizität des Aethers, in dessen Wellenbewegung das Licht bestehen sollte. Heutzutage benutzen wir zweckmäßig die völlige Uebereinstimmung dieser Gleichungen mit dem Gleichungssystem, auf das die theoretische Behandlung der elektrischen und magnetischen Erscheinungen nach Maxwell und Hertz geführt hat. Dann bedeutet X, Y, Z eine elektrische Kraft und L, M, N die magnetische Kraft, die jedesmal auftritt, sobald X, Y, Z Aenderungen erfährt, also $\frac{\partial X}{\partial t}, \frac{dY}{\partial t}, \frac{\partial Z}{\partial t}$ nicht gleich Null sind. Nach dieser elektromagnetischen Auffassung des Lichtes sehen wir die Lichtwellen als eine wellenförmige Ausbreitung einer elektrischen Kraft an, deren Richtung stets senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung steht und die stets begleitet ist von einer magnetischen Kraft, die wieder zu ihr und zur Fortpflanzungsrichtung senkrecht steht. Beide Wellen, die elektrische und die magnetische, sind stets miteinander verbunden und befinden sich in gleicher Phase, d. h. bei beiden tritt der Moment, wo die Größe der Kraft den Maximalwert erreicht, zu gleicher Zeit ein. Ersetzt man noch v durch $\frac{c}{\sqrt{\varepsilon\mu}}$ und

$\frac{p}{q}$ durch $\sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ so bedeutet c die Lichtgeschwindigkeit im leeren Raume, ε die Dielektrizitätskonstante des Mediums, in dem die Lichtwellen stattfinden, μ die Permeabilität. Es hat sich dann gezeigt, daß bei den schwachen Kräften, die in den Lichtwellen auftreten, stets $\mu = 1$ gesetzt werden kann; dann lauten unsere Gleichungen schließlich:

$$\frac{\varepsilon}{c}\frac{dX}{dt} = \frac{\partial M}{\partial z} - \frac{\partial N}{\partial y}; \quad \frac{1}{c}\frac{dL}{dt} = \frac{\partial Y}{\partial z} - \frac{\partial Z}{\partial y}$$

$$\frac{\varepsilon}{c}\frac{dY}{dt} = \frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial L}{\partial z} \quad \frac{1}{c}\frac{dM}{dt} = \frac{\partial Z}{\partial x} - \frac{\partial X}{\partial z}$$

$$\frac{\varepsilon}{c}\frac{dZ}{dt} = \frac{\partial L}{\partial y} - \frac{\partial M}{\partial x}; \quad \frac{1}{c}\frac{dN}{dt} = \frac{\partial X}{\partial y} - \frac{\partial Y}{\partial x}$$

$$\frac{\partial X}{\partial y} + \frac{\partial Y}{\partial q} + \frac{\partial Z}{dz} = 0; \quad \frac{\partial L}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial y} + \frac{\partial N}{\partial z} = 0.$$

Genügt wird diesen Gleichungen durch die Funktionen

$$X = A_x \cos\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{r}{V}\right); \quad Y = A_y \cos\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{r}{V}\right); \quad Z = A_z \cos\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{r}{V}\right)$$

und

$$L = B_x \cos\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{r}{V}\right); \quad M = B_y \cos\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{r}{V}\right); \quad N = B_z \cos\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{r}{V}\right)$$

hier bedeutet $V = c : \sqrt{\varepsilon}$ Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit und r die Richtung des Lichtstrahls. Sind l, m, n die Richtungscosinus von r, so ist dann ferner $r = lx + my + nz$ und es bestehen zwischen den B und A zufolge der Verkettung obiger Gleichungen die Beziehungen

$$B_x = -(n A_y - m A_z)\sqrt{\varepsilon}; \; B_y = -(l A_z - n A_x)\sqrt{\varepsilon};$$
$$B_z = -(m A_x - l A_y)\sqrt{\varepsilon}$$

Diese Formeln enthalten die vollständige Darstellung einer elektromagnetischen Welle.

b) Grenzbedingungen. Um den Uebergang einer solchen Welle vom Medium 1 zum Medium 2 darzustellen, wollen wir zur Vereinfachung festsetzen, daß die Grenze beider Medien die XY-Ebene sei, und daß die Z-Achse von dem ersten Medium in das zweite hinein gerichtet sei. Liegt noch der einfallende Strahl in der XZ-Ebene und bildet mit der Z-Achse den Winkel φ, so wird für ihn $l = \sin\varphi$, $m = o$, $n = \cos\varphi$. Der einfallende Strahl wird dann beim Auftreffen auf die Grenzfläche in 2 Teile gespalten, einen reflektierten und einen gebrochenen, die beide ebenfalls in der XZ-Ebene liegen und mit der Z-Achse die Winkel φ' und ψ bilden mögen. Die XZ-Ebene nennen wir die Einfallsebene.

Es tritt dann in den Ausdrücken für die Kräfte beim einfallenden Strahl die Cosinusfunktion mit dem Argument $\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x\sin\varphi + z\cos\varphi}{V_1}\right) = \Phi_e$ auf. Beim reflektierten Strahl ist das Argument $\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x\sin\varphi' + z\cos\varphi'}{V_1}\right) = \Phi_r$ und beim gebrochenen Strahl $\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x\sin\psi + z\cos\psi}{V_2}\right) = \Phi_2$

Um die Beziehungen zwischen den Richtungen dieser Strahlen zu finden, müssen wir annehmen, daß in der Grenzfläche selbst zwischen den Kräften im einen Medium und im anderen Medium feste Beziehungen bestehen. Aus Gründen der Stetigkeit ist zu erwarten, daß alle Kräfte, die parallel der Grenzfläche liegen, in beiden Medien einander gleich sind, also daß die X u. Y-Komponenten der ganzen im ersten Medium bestehenden elektrischen und magnetischen Kraft gleich den entsprechenden Komponenten im zweiten Medium sind. Daraus folgt für $z = o$: $X_1 = X_e + X_r = X_2$; $Y_1 = Y_e + Y_r = Y_2$; $L_1 = L_e + L_r = L_2$; $M_1 = M_e + M_r = M_2$.

Die Indizes e und r beziehen sich hierbei auf den einfallenden und den reflektierten Strahl, 1 und 2 auf die Medien, Für die Z-Komponenten führen dagegen die Vorstellungen über die elektrischen Kräfte zu den Bedingungen $\varepsilon_1 Z_1 = \varepsilon_1 Z_e + \varepsilon_1 Z_r = \varepsilon_2 Z_2$; $N_1 = N_e + N_r = N_2$.

Wenn aber überhaupt irgendwelche derartige Bedingungen gestellt sind, die stets für $z = o$ und für alle Werte von t und x, y erfüllt sein sollen, so kann ihnen nur dann genügt werden, wenn schon für $z = o$ die Argumente $\Phi_e = \Phi_r = \Phi_2$ sind. Also folgt aus dem Bestehen von derartigen Bedingungen schon ohne weiteres:

$$t - \frac{x\sin\varphi}{V_1} = t - \frac{x\sin\varphi'}{V_1} = t - \frac{x\sin\psi}{V_2} \quad \text{oder}$$

$$\frac{\sin\varphi}{V_1} = \frac{\sin\varphi'}{V_1} = \frac{\sin\psi}{V_2}.$$

Es muß daher sein $\varphi' = \pi - \varphi'$ (denn $\varphi = \varphi'$ hätte keinen Sinn) und $V_1 : V_2 = \sin\varphi : \sin\psi = \sqrt{\varepsilon_1} : \sqrt{\varepsilon_2} = n$. Die erste dieser Gleichungen sagt uns, daß der Einfallswinkel und der Reflexionswinkel einander entgegengesetzt gleich sind, die zweite spricht das Snelliussche Brechungsgesetz aus und fordert, daß der Brechungsquotient $n = \sqrt{\frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}}$ ist. Reflexions- und Brechungsgesetz folgen also schon aus der einfachen Tatsache, daß die Lichtvorgänge durch periodische Funktionen darzustellen sind und daß überhaupt Grenzbedingungen jederzeit erfüllt sein müssen.

c) Reflexionsformeln. Die besondere Form der Grenzbedingungen gestattet aber jetzt auch die Intensitäten des reflektierten und des gebrochenen Strahls aus der des einfallenden zu berechnen. Da in den Ausdrücken für alle Kräfte stets die gleiche Cosinusfunktion auftritt, wollen wir diese jetzt einfach mit Φ bezeichnen. Wir unterscheiden dann verschiedene Fälle.

1. Fall. Die elektrische Kraft steht senkrecht zur Einfallsebene. Das Licht heißt dann nach dem überlieferten Gebrauch in der Einfallsebene polarisiert. Dann werden die Kräfte, wenn wir die oben mit A_y bezeichneten Amplituden jetzt für den einfallenden, reflektierten und durchgehenden Strahl mit E_s, R_s und D_s bezeichnen:

$$X_e = 0; \; Y_e = E_s\Phi; \; Z_e = 0$$
$$X_r = 0; \; Y_r = R_s\Phi; \; Z_r = 0$$
$$X_2 = 0; \; Y_2 = D_s\Phi; \; Z_2 = 0$$

$$L_e = -E_s \cos\varphi \sqrt{\varepsilon_1}\,\Phi;\quad M_e = 0;$$
$$N_e = E_s \sin\varphi \sqrt{\varepsilon_1}\,\Phi$$
$$L_r = R_s \cos\varphi \sqrt{\varepsilon_1}\,\Phi;\quad M_r = 0;$$
$$N_r = R_s \sin\varphi \sqrt{\varepsilon_1}\,\Phi$$
$$L_2 = -D_s \cos\psi \sqrt{\varepsilon_2}\,\Phi;\quad M_2 = 0;$$
$$N_2 = D_s \sin\psi \sqrt{\varepsilon_2}\,\Phi$$

Durch die Anwendung der Grenzbedingungen ergibt sich dann $E_s + R_s = D_s$ und $(E_s - R_s) \sqrt{\varepsilon_1} \cos\varphi = D_s \sqrt{\varepsilon_2} \cos\psi$. Hieraus folgt weiter, weil $\sin\varphi : \sin\psi = \sqrt{\varepsilon_2} : \sqrt{\varepsilon_1}$ ist: $R_s = -E_s \frac{\sin(\varphi - \psi)}{\sin(\varphi - \psi)}$ und $D_s = E_s \frac{2 \sin\psi \cos\varphi}{\sin(\varphi + \psi)}$. Die Intensitäten sind den Quadraten dieser Amplituden proportional, wenn die Wellen in demselben Medium verlaufen. Ist also J die Intensität des einfallenden, J_r die des reflektierten, so wird in diesem Falle $J_r = \frac{\sin^2(\varphi - \psi)}{\sin^2(\varphi + \psi)} \cdot J =$

$$\left[\frac{\sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} - \cos\varphi}{\sqrt{n^2 - \sin^2\varphi} + \cos\varphi}\right]^2 J \text{ (vgl. die Kurve I Fig. 1),}$$

und weil $J - J_r = J_d$ sein muß, so wird $J_d = \frac{\sin 2\varphi \sin 2\psi}{\sin^2(\varphi + \psi)} \cdot J$.

Wenn das einfallende Licht in der Einfallsebene polarisiert ist, so sind der reflektierte und der gebrochene Strahl ebenfalls in derselben Ebene polarisiert und ihre Intensitäten sind durch obige Formeln bestimmt, sie sind in der Kurve I in Fig. 1 dargestellt. Keine dieser Intensitäten kann zu Null werden für irgendeinen Winkel φ, da φ nur dann gleich ψ wird, wenn beide gleich Null sind. Dann aber werden in obigen Ausdrücken Zähler und Nenner gleich Null. Deren Wert erhalten wir, wenn wir ψ nach der Beziehung $\sin\varphi : \sin\psi = n$ durch n und φ ersetzen. Für senkrecht einfallendes Licht wird dann:

$$J_r = \left(\frac{n-1}{n+1}\right)^2 J;\quad J_d = \frac{4n}{(n+1)^2} J.$$

Nach diesen Formeln ist der Lichtverlust durch Reflexion bei einem Strahl, der senkrecht in eine Glasplatte eindringt, 4%. Durchsetzt er die Glasplatte, so ist er 8%, wie auch aus Figur 1 hervorgeht.

2. Fall. Die elektrische Kraft liegt parallel der Einfallsebene; das Licht ist senkrecht zur Einfallsebene polarisiert. Die Kräfte erhalten dann die Werte:

$$X'_e = E_p \cos\varphi\Phi;\quad Y'_e = 0; Z'_e = -E_p \sin\varphi\Phi$$
$$X'_r = -R_p \cos\varphi\Phi;\quad Z'_r = 0;\quad Z'_r = -R_p \sin\varphi\Phi$$
$$X'_d = D_p \cos\varphi\Phi;\quad Y'_d = 0;\quad Z'_d = -D_p \sin\varphi\Phi$$
$$L'_e = 0;\quad M'_e = E_p \sqrt{\varepsilon_1}\,\Phi;\quad N'_e = 0$$
$$L'_r = 0;\quad M'_r = R_p \sqrt{\varepsilon_1}\,\Phi;\quad N'_r = 0$$
$$L'_d = 0;\quad M'_d = D_p \sqrt{\varepsilon_2}\,\Phi;\quad N'_d = 0$$

Mit Hilfe der Grenzbedingungen erhalten wir jetzt $(E_p - R_p) \cos\varphi = D_p \cos\psi$ und $(E_p + R_p) \sqrt{\varepsilon_1} = D_p \sqrt{\varepsilon_2}$ und hieraus folgt $R_p = E_p \frac{tg(\varphi - \psi)}{tg(\varphi + \psi)}$ und $D_p = E_p \frac{2 \sin\psi \cos\varphi}{\sin(\varphi + \psi) \cos(\varphi - \psi)}$

Die entsprechende Intensität des reflektierten Lichtes ist jetzt

$$J'_r = \frac{tg(\varphi - \psi)^2}{tg(\varphi + \psi)^2} J' = \left[\frac{n^2 \cos\varphi - \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi}}{n^2 \cos\varphi + \sqrt{n^2 - \sin^2\varphi}}\right]^2 J'$$

$$J'_d = \frac{\sin 2\varphi \sin 2\psi}{\sin^2(\varphi + \psi) \cos^2(\varphi - \psi)} J \text{ (vgl. Kurve II in Fig. 1).}$$

In diesem Falle wird für $\varphi + \psi = \frac{\pi}{2}$ der Ausdruck für J'_r gleich Null, d. h. also, wenn der einfallende Strahl auf dem gebrochenen senkrecht steht, so wird bei senkrecht zur Einfallsebene polarisiertem Licht gar kein Strahl reflektiert (Gesetz von Brewster). Im übrigen sind bei senkrecht zur Einfallsebene polarisiertem Licht der gebrochene und der reflektierte Strahl auch senkrecht zur Einfallsebene polarisiert.

Setzen wir hier $\varphi = \psi = 0$, betrachten also senkrecht einfallendes Licht, so erhalten wir wieder die gleichen Formeln wie vorhin für J_r und J_d, wie auch zu erwarten war, da für senkrecht einfallendes Licht eine bestimmte Einfallsebene nicht mehr definiert ist.

3. Fall. Die elektrische Kraft bilde mit der Y-Achse den Winkel α oder die Polarisationsebene sei gegen die Einfallsebene um den Winkel α geneigt. α ist dann das Azimut der Polarisation. Dann läßt sich die elektrische Kraft in zwei Komponenten zerlegen, $E_s = E \cos\alpha$ und $E_p = E \sin\alpha$, deren erste senkrecht, die zweite parallel zur Einfallsebene gerichtet ist. Für diese beiden Komponenten gelten dann die Gruppen der Formeln des Falles 1 und 2. Aus diesen erhalten wir daher die beiden Komponenten für den reflektierten und den gebrochenen Strahl. Das Azimut β des reflektierten Strahls ist dann bestimmt durch $tg\beta = \frac{R_p}{R_s} = \frac{\cos(\varphi + \psi)}{\cos(\varphi - \psi)} . tg\alpha$. Für den gebrochenen Strahl erhalten wir für das Azimut β' $tg\beta' = \frac{tg\alpha}{\cos(\varphi - \psi)}$ (vgl. die Kurven der Fig. 2). Ein unter dem Azimut α einfallender Strahl wird also zerlegt in einen reflektierten und einen gebrochenen, die beide polarisiert sind, deren Azimute aber andere sind als das des einfallenden Strahls. Die Amplituden für diese Strahlen sind $R = R_s \cos\beta + R_p \sin\beta$ und $D = D_s \cos\beta' + D_p \sin\beta'$. Die Intensitäten werden jetzt:

$$J_{r.a} = \left[\frac{\sin^2(\varphi - \psi)}{\sin^2(\varphi + \psi)} \cos^2\alpha + \frac{tg^2(\varphi - \psi)}{tg^2(\varphi + \psi)} \sin^2\alpha\right] J$$

$$J_{d.a} = \left[\frac{\sin 2\varphi \sin 2\psi}{\sin^2(\varphi + \psi)} \cos^2\alpha + \frac{\sin 2\varphi\, 2 \sin\psi}{\sin^2(\varphi + \psi) \cos^2(\varphi - \psi)} \sin^2\alpha\right] J$$

Bemerkenswert ist, daß für den Fall, daß der einfallende Strahl auf dem gebrochenen senkrecht steht, also $\varphi + \psi = \frac{\pi}{2}$, der Winkel β stets gleich Null wird; also für jedes Azimut α

ist in diesem Falle der reflektierte Strahl in der Einfallsebene polarisiert (B r e w s t e r sches Gesetz).

4. F a l l. Das einfallende Licht ist natürliches Licht, in dem keine Polarisationsrichtung bevorzugt ist. Wir sind dann berechtigt, das einfallende Licht anzusehen als zur Hälfte in der Einfallsebene und zur anderen Hälfte senkrecht dazu polarisiert. Daraus ergeben sich sofort die Intensitätsformeln:

$$J_r'' = \frac{1}{2}\left[\frac{\sin^2(\varphi-\psi)}{\sin^2(\varphi+\psi)} + \frac{tg^2(\varphi-\psi)}{tg^2(\varphi+\psi)}\right] J''$$

$$J_d' = \frac{1}{2}\left[\frac{\sin 2\varphi \sin 2\psi}{\sin^2(\varphi+\psi)} + \frac{\sin 2\varphi \sin 2\psi}{\sin^2(\varphi+\psi)\cos^2(\varphi-\psi)}\right] J''$$

Reflektiertes und durchgelassenes Licht bestehen demnach beide aus 2 Teilen, deren einer in der Einfallsebene, deren anderer senkrecht dazu polarisiert sind. Beide Teile sind aber nicht mehr gleich groß; in beiden haben wir daher nicht mehr natürliches Licht, sondern ein Gemisch von natürlichem mit polarisiertem. Der Ueberschuß des einen Teils über den anderen gibt die Intensität des polarisierten Lichtes an, das dem natürlichen beigemischt ist; die polarisierten Intensitäten erhalten wir also, indem wir in obigen Formeln das Pluszeichen durch ein Minuszeichen ersetzen. Die Polarisationsebene des polarisierten Anteils liegt beim reflektierten Licht in der Einfallsebene, beim gebrochenen senkrecht zur Einfallsebene. Berechnet man die Intensitäten dieser polarisierten Anteile, so findet man, daß sie für beide Strahlen gleich groß sind.

Auch für einfallendes natürliches Licht zeigt sich, daß, im Falle $\varphi + \psi = \frac{\pi}{2}$ ist, das ganze reflektierte Licht in der Einfallsebene polarisiert ist (B r e w s t e r s Gesetz). Dieser Winkel heißt daher auch der P o l a r i s a t i o n s w i n k e l; er ist bestimmt durch die Bedingung $tg\varphi = n$; er beträgt für gewöhnliches Glas 56½°.

Alle diese Formeln über die Intensitäten des reflektierten Lichtes sind wiederholt eingehender experimenteller Prüfung unterzogen und haben sich überall gut bestätigt. Eine Abweichung hat sich allerdings mehr oder weniger deutlich nachweisen lassen. Fällt natürliches Licht unter dem Polarisationswinkel auf eine reflektierende Fläche, so zeigt sich nach J a m i n das reflektierte Licht niemals wirklich vollständig rein polarisiert, sondern es ist stets etwas elliptisch polarisiert. Die Erklärung für diese Abweichung von den strengen Formeln hat D r u d e gegeben, indem er annahm, daß jede Oberfläche immer mit einer gewissen Oberflächenschicht von optisch veränderter Beschaffenheit bedeckt ist. Ein zweiter Ausnahmefall, in dem diese Formeln ebenfalls versagen, tritt dann ein, wenn die reflektierende Substanz elektrisch gut leitend ist, wie dies bei Metallen der Fall ist. Diese Körper absorbieren zugleich das einfallende Licht in sehr hohem Grade. Ueber die Besonderheiten, die bei der Metallreflexion eintreten, vgl. den Artikel „L i c h t r e f l e x i o n“.

3. Zirkulare und elliptische Polarisation. Wir sehen das in einer Ebene polarisierte Licht als einen Schwingungsvorgang an, bei dem wir uns irgendein Aether- oder elektrisches Teilchen in einer linearen Bahn senkrecht zur Strahlrichtung hin und her bewegt vorstellen. Wir haben weiter bereits die Vorstellung als zulässig erkannt, daß eine solche Schwingung nach 2 Achsen in Komponenten zerlegbar gedacht werden

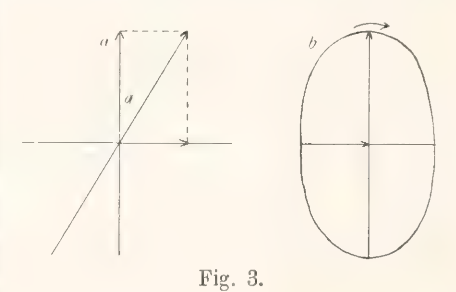


Fig. 3.

kann, und daß man auch wieder aus 2 Komponenten eine solche lineare Schwingung zusammensetzen kann. Damit aber aus 2 solchen Einzelschwingungen wirklich eine lineare Schwingung entstehen kann, ist Voraussetzung, daß bei beiden das bewegte Teilchen im gleichen Augenblick durch die Mittellage geht und auch im gleichen Augenblick die äußersten Lagen erreicht. In Figur 3 a ist dies durch die Vektoren OA und OB angedeutet mit ihren Pfeilspitzen, die den Maximalwerten der Schwingung entsprechen sollen; OC ist dann der Maximalwert der resultierenden Schwingung, diese selbst erfolgt vollständig in der Richtung OC. In Figur 3 b ist gezeigt, welche Bewegung entsteht, wenn wir die gleichen Einzelschwingungen vereinigen, nur mit dem Unterschied, daß die Schwingung OB die Mittellage erreicht in dem Augenblick, wo OA den größten Wert hat; wir sagen dann, die Schwingung OB ist um $\frac{\lambda}{4}$ gegen OA in der Phase zurück. Das bewegte Teilchen muß dann offenbar eine Ellipse beschreiben, und diese in dem Sinne umlaufen, wie die oberste Pfeilspitze andeutet. Wenn sich nun polarisierte Lichtschwingungen in allen beliebigen Verhältnissen zusammensetzen lassen, müssen wir hiernach erwarten, daß es beim Licht auch Strahlen gibt, in denen der Schwingungszustand derartig ist, daß der Lichtvektor im Verlaufe einer Schwingung eine vollständige Ellipse beschreibt. Solches Licht würden wir e l l i p t i s c h p o l a r i s i e r t e s L i c h t nennen. Es muß stets entstehen, wenn 2 Komponenten auftreten, die einen Unterschied in der Phase haben. In dem besonderen Fall, wo die Größe beider Komponenten die gleiche ist, die Phase aber $\frac{\lambda}{4}$, wird die Ellipse zu einem Kreis und wir haben z i r k u l a r p o l a r i s i e r t e s

L i c h t, in dem nun gar keine Polarisationsrichtung mehr bevorzugt ist. Solches elliptisch und zirkular polarisiertes Licht tritt nun in der Tat auf und kann aus dem F r e s n e l schen Reflexionsgesetze ohne weiteres gefolgert werden.

Die F r e s n e l schen Reflexionsformeln sind gültig unabhängig davon, ob das Licht von dem optisch dünneren oder dem dichteren Medium aus die Grenzfläche erreicht. In dem Fall jedoch, wo das Licht vom dichteren Medium nach den dünneren hin sich bewegt, wo also in den Formeln $n < 1$ ist, bedürfen sie noch einer weiteren Deutung. Mit wachsendem Einfallswinkel φ wird dann ein Wert für φ erreicht werden, wo $n = \sin\varphi$ ist, dann folgt aus den Formeln für die reflektierten Intensitäten, daß $J_r = J$ wird, daß also die ganze Lichtintensität im reflektierten Licht sich findet und daher $J_d = 0$ sein muß. Das Licht wird total reflektiert. In der Tat würde der zugehörige Austrittswinkel $\psi = 90^0$, d. h. das Licht kann gar nicht mehr heraustreten. Der Winkel φ, für den $\sin\varphi = n$ ist, heißt der G r e n z w i n k e l d e r T o t a l r e f l e x i o n. Nun kann aber natürlich der Einfallswinkel auch noch größer werden, dann tritt in den Formeln für das reflektierte Licht die Größe $\sqrt{n^2 - \sin^2\varphi}$ auf, d. h., wir erhalten jetzt komplex imaginäre Werte. Diese bedürfen noch einer Deutung.

Wir erhalten, wenn wir $\sqrt{n^2 - \sin^2\varphi}$ durch $i\sqrt{\sin^2\varphi - n^2}$ ersetzen, für die Amplitude der reflektierten elektrischen Kraft, wenn das einfallende Licht in der Einfallsebene polarisiert war:

$$R_s = -E_s \frac{i\sqrt{\sin^2\varphi - n^2} - \cos\varphi}{i\sqrt{\sin^2\varphi - n^2} + \cos\varphi}$$

und bei der entgegengesetzten Polarisation

$$R_p = E_p \frac{n^2\cos\varphi - i\sqrt{\sin^2\varphi - n^2}}{n^2\cos\varphi + i\sqrt{\sin^2\varphi + n^2}}.$$

Die vollständige Darstellung der reflektierten Strahlen erhalten wir daher, indem wir die Cosinusfunktion Φ multiplizieren mit diesen komplexen Amplituden. Da nun $e^{i\varphi} = \cos\varphi + i\sin\varphi$ ist, so läßt sich $\cos\varphi$ stets ansehen als der reelle Teil der Funktion $e^{i\varphi}$. Wenn dann $\cos\varphi$ mit einer komplexen Größe multipliziert erscheint, so würde in dem Falle, wo die Komplexe die Form $e^{i\delta}$ hat, $e^{i\delta} \cdot e^{i\varphi} = e^{i(\varphi + \delta)} = \cos(\varphi + \delta) + i\sin(\varphi + \delta)$ sein. Für die Darstellung von Wellen bedeutet also ein Faktor $e^{i\delta}$, daß die Phase der Welle um die Größe δ verändert ist; der Faktor $e^{i\delta}$ kann dadurch ersetzt werden, daß der Phase, d. i. dem Argumente der Funktion Φ die Größe δ hinzugefügt wird. Die in den Ausdrücken für R_s und R_p auftretenden komplexen Faktoren lassen sich aber auf die Form $e^{i\delta}$ bringen, wie man sofort sieht, wenn man sie in einen reellen und einen imaginären Teil ordnet von der Gestalt $a + ib$; dann zeigt sich $a^2 + b^2 = 1$, also kann $a = \cos\delta$, $b = \sin\delta$ gesetzt werden. Wir können daher jetzt schreiben $R_s = -E_s e^{i\delta_s}$; $R_p = E_p e^{i\delta_p}$. Da der Exponentialfaktor hierbei nur zur Phase der Wellen einen Beitrag liefert nicht zur Größe der Amplitude, so folgt, daß die Amplitude und folglich auch die Intensitäten der reflektierten und einfallenden Wellen die gleichen sind.

Es wird also stets, wenn φ größer als der Grenzwinkel der Totalreflexion ist, alles Licht reflektiert; in dem ganzen Gebiete herrscht Totalreflexion, aber bei der Reflexion tritt die Phasenverschiebung δ ein. Die Werte der δ sind bestimmt durch die Gleichungen

$$e^{i\delta_s} = \frac{i\sqrt{\sin^2\varphi - n^2} - \cos\varphi}{i\sqrt{\sin^2\varphi - n^2} + \cos\varphi};$$

$$e^{i\delta_p} = \frac{n^2\cos\varphi - i\sqrt{\sin^2\varphi - n^2}}{n^2\cos\varphi + i\sqrt{\sin^2\varphi - n^2}}$$

Von besonderem Interesse ist meistens die Differenz $\Delta = \delta_s - \delta_p$ dieser beiden Phasenverschiebungen. Sie wird gefunden durch Division beider Gleichungen

$$e^{i\Delta} = e^{i(\delta_s - \delta_p)} = \frac{\sin^2\varphi + i\cos\varphi\sqrt{\sin^2\varphi - n^2}}{\sin^2\varphi - i\cos\varphi\sqrt{\sin^2\varphi - n^2}}$$

hieraus folgt für Δ

$$\operatorname{tg}\tfrac{1}{2}\Delta = \frac{\cos\varphi\sqrt{\sin^2\varphi - n^2}}{\sin^2\varphi}.$$

Die Phasendifferenz Δ verschwindet ganz für $\varphi = 90^0$ und für den Grenzwinkel der Totalreflexion. Dazwischen muß sie einen Maximalwert annehmen. Dieser ist gegeben durch $\operatorname{tg}\tfrac{1}{2}\Delta' = \frac{1 - n^2}{2n}$ und tritt ein für den Winkel φ', wenn $\sin^2\varphi' = \frac{2n^2}{1 + n^2}$ ist.

Ist jetzt das einfallende Licht unter einem Azimut α polarisiert, so besteht das total reflektierte Licht aus 2 Komponenten, deren Amplituden der Größe nach verschieden sind: $R_s = E\cos\alpha$; $R_p = E\sin\alpha$. Aber aus diesen beiden Komponenten setzt sich jetzt kein einfach polarisiertes Licht zusammen, sondern, weil jetzt die Phasendifferenz Δ zwischen beiden Komponenten besteht, so beschreibt der Lichtvektor während einer vollen Periode eine Drehung um 360^0 und bestreicht dabei wegen der gleichzeitigen Längenänderung die Fläche einer Ellipse. Derartiges Licht heißt e l l i p t i s c h p o l a r i s i e r t.

Bemerkenswert ist, daß beim total reflektierten Licht die Phasendifferenz Δ unabhängig von Azimut des einfallenden Strahls ist und nur vom Einfallswinkel φ abhängt, wir können daher durch mehrfach wiederholte Totalreflexion der Differenz Δ jede-

beliebige Größe geben. Ist $\Delta = \frac{\pi}{2}$ und $\alpha = 45^0$, so daß $R_s = R_p$ wird, so wird die vom Lichtvektor beschriebene Fläche ein Kreis; das Licht heißt dann z i r k u l a r p o l a r i s i e r t.

Für Glas vom Brechungsindex 1,51 (also in unseren Formeln $n = \frac{1}{1{,}51}$) tritt die maximale Phasendifferenz für $\varphi' = 51^0\,20'$ ein, dann ist $\Delta = 45^0\,36'$. Wählen wir den Winkel $\varphi = 54^0\,37'$ (oder auch $48^0\,37'$) so wird $\Delta = 45^0$.

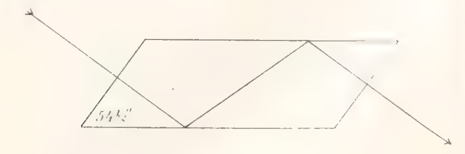


Fig. 4.

In einem Glasprisma (Fig. 4), dessen Endflächen unter $54\frac{1}{2}^0$ gegen die Seiten geneigt sind, wird ein senkrecht zu einer Endfläche eintretender Strahl zweimal reflektiert werden können und wieder senkrecht austreten. Die Phasendifferenz seiner beiden Komponenten ist dann 90^0 oder eine halbe Wellenlänge; war noch das Azimut des einfallenden Strahls $\alpha = 45^0$, so ist der austretende zirkular polarisiert. Drehen wir das Azimut α von 0 über $\frac{\pi}{4}$, $\frac{\pi}{2}$ usw. einmal herum, so durchläuft die Schwingungsfigur des austretenden Strahls nacheinander die die Formen der Figur 5. Lassen wir dagegen das Azimut α stets gleich 45^0 sein, ändern dagegen den Einfallswinkel (wobei allerdings jedesmal ein anderer Glasklotz genommen werden muß, damit der einfallende Strahl senkrecht zur Endfläche steht und nicht durch die Brechung schon eine Drehung der Polarisationsebene erfährt), so wird, wenn wir den Strahl 2 mal total reflektieren lassen, während φ sich vom Grenzwinkel der Totalreflexion bis zu $\varphi = 54\frac{1}{2}^0$ verändert, die Schwingungsfigur die Formen der Figur 6 durchlaufen.

Diese beiden Reihen elliptisch polarisierten Lichtes lassen sich auch experimentell dadurch unterscheiden, daß bei der ersten Reihe, wenn man durch einen B a b i n e t - schen Kompensator, (über den am Ende des nächsten Abschnittes Genaueres mitgeteilt

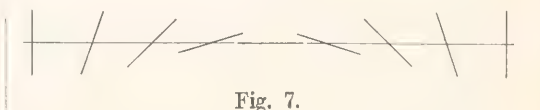


Fig. 7.

wird), die Phasenverschiebung wieder aufhebt und das Azimut der wiederhergestellten Polarisation bestimmt, für jedes Glied dieselbe Kompensatorstellung, nämlich die für $\Delta = \frac{\pi}{2}$, erforderlich ist und die dann erhaltenen Azimute der wiederhergestellten Polarisation durch die Reihe der Figur 7 dargestellt sind.

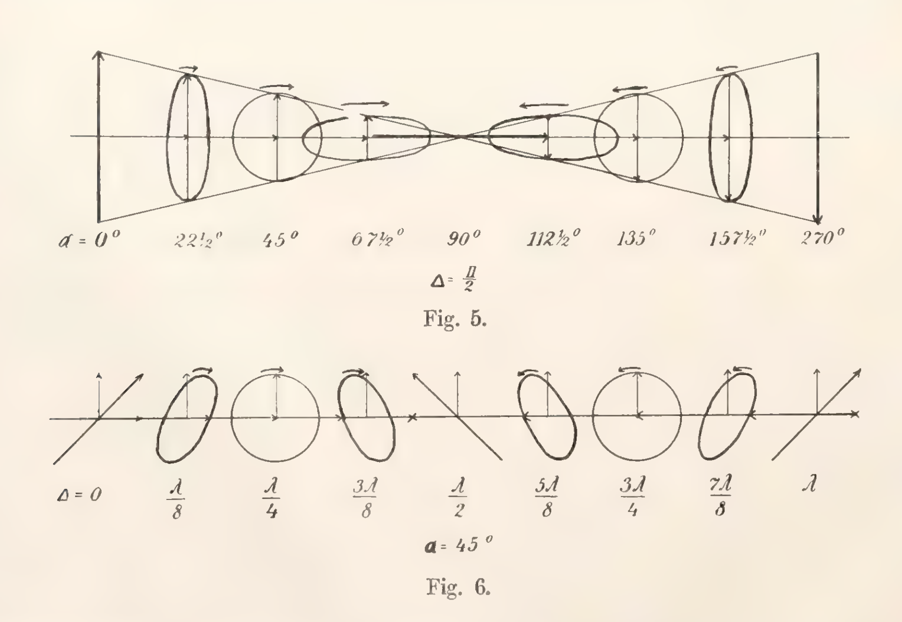


Fig. 5.

Fig. 6.

Bei der 2. Reihe sind zur Wiederherstellung der Polarisation für jedes Glied andere Kompensatorstellungen nötig und das wiederhergestellte Azimut β ist stets gleich $\alpha = 45^0$ wie beim ersten Glied der Reihe Figur 6.

3. Polarisatoren und Mittel zur Prüfung des polarisierten Lichtes. Aus den Fresnelschen Formeln folgt, daß natürliches Licht, das unter dem Polarisationswinkel auf eine reflektierende Fläche fällt, vollständig linear polarisiert wird, und zwar in der Einfallsebene polarisiert. Eine unter dem Polarisationswinkel von $56\frac{1}{2}^0$ den Lichtstrahlen entgegengestellte Glasplatte ist also der einfachste Apparat, um polarisiertes Licht zu erhalten (Polarisator). Wird dem polarisierten Licht eine zweite Glasplatte unter dem gleichen Winkel entgegengestellt, und wieder das reflektierte Licht beobachtet, so ist dies, wenn die Einfallsebenen beider Platten zusammenfallen, von größter Helligkeit. Dreht man die zweite Platte um die Richtung des einfallenden Strahls als Achse, so nimmt die Helligkeit des reflektierten Strahls ab, um bei Senkrechtstellung beider Einfallsebenen zueinander zu Null zu werden. Die zweite Platte wird in diesem Falle als Analysator bezeichnet. Bei der Verwendung solcher einfachen Glasplatten als Polarisator und Analysator liegt in der Ablenkung des Lichtstrahls um 113^0 aus der ursprünglichen Richtung an beiden Platten eine große Unbequemlichkeit, die sich namentlich beim Drehen des Analysators störend bemerkbar macht. Man vermeidet diesen Uebelstand, indem man im Analysator und Polarisator jedesmal 2 parallele Glasplatten verwendet, die nach Figur 8 angeordnet sind. Beim Drehen des Analysators um den einfallenden Strahl findet dann nur noch eine Parallelverschiebung des austretenden Strahls, aber keine Richtungsänderung statt. Bei diesen Polarisatoren werden die Rückseiten der Glasplatten, um mehrfache Spiegelbilder und das durchgehende Licht zu vermeiden, geschwärzt. Derartige Polarisatoren sind die einfachsten und billigsten und für viele Zwecke ausreichend; sie haben den Nachteil, daß gegen die Haupteinfallsrichtung geneigt einfallendes Licht nicht mehr vollständig polarisiert ist. Sie können daher zwar für ein paralleles Lichtbündel von sehr großem Querschnitt verwendet werden und geben, solange nur paralleles Licht zur Verwendung kommt, ein großes Gesichtsfeld. Bei divergenten Lichtbündeln ist dagegen nur ein kleines Gesichtsfeld brauchbar. Außerdem ist die Lichtstärke nur gering, da ein großer Teil des Lichtes in die Glasplatten eindringt und für die Beobachtung verloren geht.

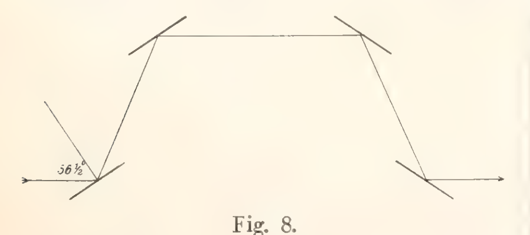


Fig. 8.

Man kann auch das durch eine schräg gestellte Glasplatte hindurchgehende Licht benutzen; nach den Fresnelschen Formeln ist dieses jedoch nur teilweise polarisiert. Legt man jedoch eine ganze Reihe dünner Glasplatten hintereinander, so wird der Anteil des nicht polarisierten Lichtes in dem hindurchgehenden immer geringer und kann schließlich vernachlässigt werden. So erhält man den Glasplattensatz, der sowohl als Analysator als auch als Polarisator benutzt werden kann. Für seine Verwendbarkeit gilt das gleiche, wie für die Glasplattenpaare.

In den meisten Fällen, zumal wenn größere Lichtstärke und größeres Gesichtsfeld gefordert wird, benutzt man als Polarisatoren und Analysatoren Instrumente, die nicht auf den Reflexionsgesetzen, sondern den Gesetzen der Doppelbrechung in Kristallen beruhen. Beim Eintritt eines Lichtstrahls in einen Kristall wird er im allgemeinen in 2 Teile gespalten, die in zueinander senkrechten Ebenen polarisiert sind (vgl. den Artikel „Doppelbrechung"), sobald es gelingt, einen dieser Strahlen zu entfernen, so hat man einen Apparat, der als Polarisator und Analysator dienen kann. Die verbreitetste Konstruktion dieser Art ist das Nicolsche Prisma. Zu seiner Herstellung wird ein prismatischer Kalkspatkristall (siehe Figur 9) zunächst an seinen Endflächen so abgeschliffen, daß der Neigungswinkel der Endflächen, der im natürlichen Kristall 71^0 mit der Seitenkante beträgt, auf 68^0 verkleinert wird, dann schneidet man das Prisma diagonal durch, daß die Schnittfläche senkrecht zu den Endflächen steht, und schließlich werden beide Teile mit Kanadabalsam wieder zusammengekittet. Fällt in der Richtung der Längsachse ein Lichtstrahl auf ein solches Nicolsches Prisma, so wird er in den ordentlichen und den außerordentlichen zerlegt. Ersterer erleidet an der Kanadabalsamschicht Totalreflexion, während der letztere durch diese Schicht hindurchdringen kann und parallel der Eintrittsrichtung den Nicol wieder verläßt. Die Polarisationsebene dieses hindurchgehenden Strahls liegt in der langen Diagonale der Querschnittsfigur des Prismas. Nach der elektromagnetischen Theorie

liegt daher die Schwingungsrichtung des elektrischen Vektors, die dem Fresnelschen Lichtvektor entspricht, in der kurzen Diagonale des Querschnittsrhombus. Das durch den Nicol hindurchgelangende Licht ist vollkommen linear polarisiert und von großer Lichtstärke, nahezu von der Hälfte der Intensität des einfallenden natürlichen Lichtes. Der Gesichtsfeldwinkel ist dadurch begrenzt, daß bei zu starker Neigung des einfallenden Strahles nach unten (Figur 9) der ordentliche Strahl nicht mehr total reflektiert wird und bei zu starker Neigung nach oben tritt auch für den außerordentlichen Strahl Totalreflexion ein. Der erreichbare Gesichtsfeldwinkel beträgt etwa 30°, ist also bedeutend größer als mit Glasplatten erreichbar ist.

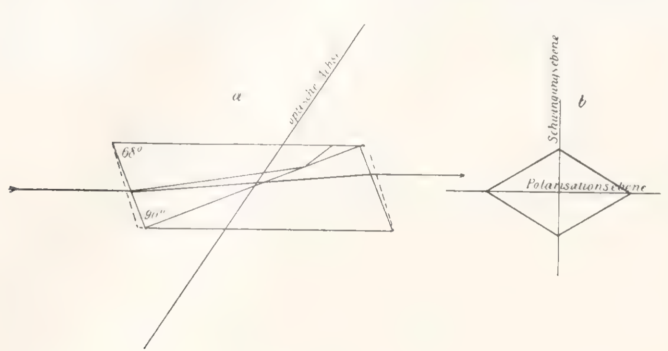


Fig. 9.

Die lange Form des Nicolschen Prismas erfordert zur Herstellung verhältnismäßig große Stücke guten Kalkspats, wodurch das Prisma ziemlich teuer wird. Foucault hat deswegen die Kanadabalsamschicht durch eine Luftschicht ersetzt, und konnte daher den Diagonalschnitt viel steiler legen und so dem Prisma eine viel kürzere Form geben. Glan hat eine noch kürzere Form erreicht, indem er die optische Achse des Kristalls anders orientierte und zugleich die Endflächen senkrecht zur Strahlrichtung anordnete. Die beiden Prismen von Foucault und Glan haben aber nur ein viel kleineres Gesichtsfeld, nur etwa 8°, und so kommt es, daß doch in den weitaus meisten Fällen das Nicolsche Prisma als Analysator und Polarisator Verwendung findet.

Fig. 10a. Fig. 10b.

Wenn man 2 Nicolsche Prismen als Polarisator und Analysator hintereinander schaltet und in gekreuzte Stellung bringt, so erscheint aber doch nicht, wie man erwarten sollte, das ganze Gesichtsfeld vollständig dunkel, sondern man bemerkt einen vollständig dunkeln breiten Streifen sich schräg durch das Gesichtsfeld ziehen und beiderseits ist die Dunkelheit geringer. Die Erklärung hierfür ist folgende. Die elektrische Schwingungsebene des austretenden Strahls ist bestimmt durch die Richtung des Strahls und die optische Achse des Kristalls. Da nun die optische Achse im Nicolschen Prisma schräg durch dasselbe hindurch geht (Figur 9), so wird die Schwingungsebene eines Strahles, der schief durch das Prisma geht, indem er die Ebene der Figur 9 von vorn nach hinten schräg durchsetzt, nicht mehr genau parallel der Polarisationsebene des mittleren Strahles sein. Die Lage der Schwingungsebenen ordnen sich vielmehr im Gesichtsfeld nach Figur 10 a.

Ordnen wir nun 2 Nicols in gekreuzter Stellung hintereinander an, so lagern sich die Schwingungsebenen im Gesichtsfeld übereinander, wie Figur 10 b es zeigt. Nur dort, wo die Schwingungsebenen sich genau senkrecht durchschneiden, kann völlige Auslöschung des Lichtes eintreten, in der in der Figur schraffiert angedeuteten Zone. Daher entsteht das dunkle Band, der „Landoltsche Streifen“ mit der anliegenden helleren Zone. Eine sehr sinnreiche Anwendung

dieser Erscheinungen wird weiter unten bei Beschreibung der Instrumente zur Messung der Drehung der Polarisationsebene erwähnt werden.

Kommt es weniger auf ein helles Gesichtsfeld als auf einen kleinen handlichen Apparat an, so kann als Polarisator und Analysator eine Platte aus Turmalin verwendet werden. Ist die Turmalinplatte parallel zur optischen Achse des Kristalls herausgeschnitten, so hat sie die bemerkenswerte Eigenschaft, den ordentlichen Strahl vollständig zu absorbieren, es tritt also nur der außerordentliche Strahl aus und dieser ist vollständig polarisiert. Meist sind solche Turmaline mehr oder wenig dunkel gefärbt, grünlich oder braun, so daß sie keine bedeutende Lichtstärke geben. Es gibt aber auch fast farblose Turmaline, allerdings selten, die sich dann natürlich besonders gut zu Polarisatoren eignen. Zwei solche Turmalinplatten in eine handliche Drahtzange gefaßt, stellen ein sehr bequemes Polarisationsinstrument, die Turmalinzange, dar. Dreht man den einen Kristall so, daß seine Polarisationsebene senkrecht zu der des anderen steht, so wird kein Licht durchgelassen. Bringt man dann zwischen beide Platten einen durchsichtigen Körper, z. B. eine Glasplatte, so erkennt man sofort, ob sie auf den Polarisationszustand des durchgehenden Lichtes einen Einfluß hat. Hat das Glas irgendwelche innere Spannung durch zu schnelle Abkühlung, so wird das Gesichtsfeld an den entsprechenden Stellen aufgehellt.

Für manche Versuche ist es vorteilhaft, einen Polarisator zu haben, der 2 zueinander senkrecht polarisierte Strahlen liefert, die etwas verschiedene Richtung haben. Jedes Prisma eines doppelbrechenden Kristalls würde hierzu geeignet sein, da es den Strahlengang der Figur 11 liefert.

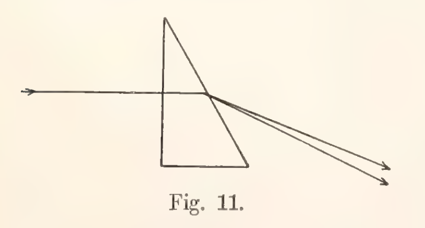


Fig. 11.

Um auch die starke Richtungsänderung beider austretenden Strahlen gegen den einfallenden zu vermeiden, kombiniert man zweckmäßig ein rechtwinkliges Kalkspatprisma, dessen optische Achse parallel der längeren Kathetenfläche ist, mit einem Glasprisma, dessen Berechnungsquotient dem des außerordentlichen Strahles im Kalkspat gleich ist (Figur 12). Der außerordentliche Strahl kann dann dies System geradlinig durchsetzen, während der ordentliche abgelenkt wird. Da hierbei das Glas nicht für alle Wellenlängen die gleiche Lichtbrechung hat, wie sie der ordentliche Strahl im Kalkspat erfährt, hat Sénarmont das Glasprisma durch ein Kalkspatprisma ersetzt, dessen optische Achse senkrecht zur großen Kathetenfläche steht. Läßt man durch dieses System das Licht hindurchtreten, so geht der ordentliche Strahl in allen Farben geradlinig hindurch, während der außerordentliche abgelenkt wird. Das Prisma von Rochon erreicht den gleichen Zweck durch Kombination eines rechtwinkligen Kalkspatprismas, dessen Achse parallel der Einfallsrichtung des Lichtes ist, mit einem gleichen, dessen Achse parallel den Prismenkanten, also senkrecht zur Ebene der Figur 12 ist; auch dann geht der ordentliche Strahl geradlinig hindurch, der außerordentliche wird abgelenkt. Wollastons Prisma unterscheidet sich von dem von Rochon dadurch, daß im ersten Prisma die Achse senkrecht zur Einfallsrichtung in der Ebene der Figur 12, im zweiten senkrecht zu dieser Ebene steht. Es werden in diesem Falle beide Strahlen nach entgegengesetzter Richtung abgelenkt. Die Divergenz der Strahlen ist daher die doppelte wie beim Rochonprisma, dafür sind aber auch beide chromatisch gefärbt.

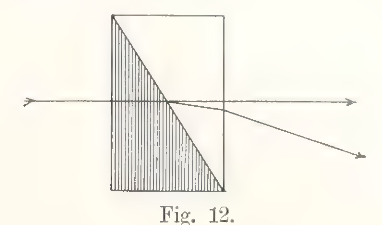


Fig. 12.

Die Verwendung dieser Polarisatoren, die beide Strahlen hindurchtreten lassen, erfolgt meist in der Form, daß man durch sie hindurch nach einer kleinen, meist quadratischen Oeffnung in einer Blende hindurchsieht. Man sieht dann 2 Bilder der Oeffnung nebeneinander liegen, von denen beim Drehen des Rochonschen oder eines ähnlichen Prismas das eine um das andere herumwandert. War das durch die Blende hindurchtretende Licht völlig unpolarisiert, so bleiben beide Bilder stets gleich hell. Ist dem durch die Blende gelangenden Licht polarisiertes beigemischt, so wechseln die Bilder ihre Helligkeit in entgegengesetztem Sinne; während das eine die größte Helligkeit hat, ist das andere am dunkelsten. In dieser Stellung fällt die Polarisationsebene des hellen Bildes mit der des dem beobachteten Lichte beigemischten polarisierten Licht zusammen. Bringt man nun hinter das

Prisma noch einen Nicol, so kann man durch Drehen diesem eine solche Stellung geben, daß wieder beide Bilder gleich hell sind. Aus der Stellung des Nicol zum Prisma kann man dann entnehmen, ein wie großer Anteil des untersuchten Lichtes polarisiert war (Polarimeter von Cornu).

Bedeckt man die Blendenöffnung mit einer Kristallplatte, so kommt es vor, daß die beiden Bilder verschieden gefärbt erscheinen. Dies ist dann ein Beweis dafür, daß der außerordentliche und ordentliche Strahl in dem untersuchten Kristall in verschiedener Weise absorbiert werden. Der Kristall ist dichroitisch. Eine für diesen Zweck geschaffene Kombination eines Rochonschen Prismas mit einer Blende und einer Lupe, durch welche die Blende scharf gesehen wird, ist als Haidingersche Lupe bekannt.

Wenn es sich nur darum handelt, zu erkennen, ob einer Lichtmenge geringe Mengen polarisierten Lichtes beigemengt sind, so ist das Savartsche Polariskop besonders empfindlich. Sein Hauptbestandteil ist eine Quarzdoppelplatte, deren beide Teile gleich dick und aus einem Quarzkristall unter einer Neigung von 45° gegen die optische Achse herausgeschnitten sind. Dann sind beide Platten so aufeinander gelegt, daß ihre Hauptschnitte zueinander senkrecht stehen, daß also der Strahl, der die erste Platte als ordentlicher Strahl durchdringt, in der zweiten Platte außerordentlicher Strahl wird. Hinter dieser Platte ist ein Analysator, Nicol oder Turmalinplatte, angebracht, dessen Polarisationsebene den Winkel der Hauptschnitte der Platte halbiert. Fällt durch diesen Apparat polarisiertes Licht, dessen Polarisationsebene senkrecht oder parallel der Polarisationsebene des Analysators ist, so wird im Gesichtsfeld ein Streifensystem sichtbar, das im ersten Falle ganz den bekannten Fresnelschen Streifen bei Fresnels Spiegelversuch (vgl. den Art. „Interferenz des Lichtes") gleicht, im zweiten Falle dessen komplementäres Bild ist. Beobachtet man mit dem Apparat irgendwelches beliebiges Licht, so erkennt man an dem Sichtbarwerden der Streifen beim Drehen des Apparates um seine Achse noch sehr geringe Spuren von beigemengtem polarisierten Licht und zugleich die Lage seiner Polarisationsebene.

Der Nachweis, daß irgendeiner Lichtmenge ein bestimmter Anteil polarisierten Lichtes beigemengt ist und die Feststellung seiner Polarisationsebene genügt in vielen Fällen noch nicht, um den Charakter des Lichtes vollständig zu erkennen. Es kann auch elliptisch und zirkular polarisiertes Licht beigemengt sein. Das wichtigste Hilfsmittel, um auch diese Lichtarten herausfinden und bestimmen zu können, ist das Viertelwellenlängenplättchen. Schneidet man aus einem doppelbrechenden Kristall eine dünne Platte heraus, die nicht gerade senkrecht zu einer optischen Achse geschnitten ist, so wird ein sie durchdringender Lichtstrahl in 2 Strahlen gespalten, die in 2 zueinander senkrecht stehenden Ebenen polarisiert sind. Beide Strahlen haben ungleiche Fortpflanzungsgeschwindigkeit im Kristall und erhalten dadurch beim Wiederaustritt aus dem Kristall eine Phasendifferenz gegeneinander. Die Größe dieser Phasendifferenz hängt ab von der Dicke des Plättchens und es läßt sich stets eine bestimmte Dicke angeben, für die die Phasendifferenz gerade $^1/_4$ Wellenlänge ($^1/_4\,\lambda$) ist. In der Regel werden solche Plättchen aus Glimmer hergestellt, sie sind dann senkrecht zur Ebene der optischen Achsen und zur Halbierungslinie des spitzen Winkels zwischen diesen Achsen geschnitten und haben eine Dicke von 0,032 mm. Die Polarisationsebenen liegen in der Ebene der Achsen und senkrecht dazu. Auch aus Gips lassen sich Viertelwellenlängenplättchen herstellen; sie werden dann parallel zur Ebene der optischen Achsen abgespalten. Natürlich können diese Plättchen nur für eine einzige Wellenlänge genau $^1/_4\,\lambda$ Plättchen sein; bei der geringen Dicke sind die Abweichungen hiervon für die anderen Wellenlängen des sichtbaren Spektrums praktisch von geringer Bedeutung. Man wählt die Plättchen so, daß sie für das hellste Licht im Spektrum, für Gelb, gerade Viertelwellenlängenplättchen sind.

Läßt man das Licht aus einem Polarisator durch ein solches Viertelwellenlängenplättchen treten und orientiert es so, daß seine Polarisationsebenen unter 45° gegen die des Polarisators gestellt sind, so besteht das austretende Licht aus 2 Teilen gleicher Amplitude mit $^1/_4\,\lambda$ Phasendifferenz; sie ergeben daher einen zirkular polarisierten Strahl. Betrachtet man das austretende Licht daher durch einen Analysator, so darf beim Drehen des Analysators eine Aenderung der Helligkeit nicht eintreten. Da jedoch das Plättchen nur für gelbes Licht wirklich zirkular polarisiertes Licht liefert, so wird bei Anwendung von weißem Licht das mehr nach rot hin gelegene Ende des Spektrums nur elliptisch polarisiert sein und ebenso das nach dem blauen Ende zu gelegene Licht. Die großen Achsen dieser beiden Ellipsen stehen aufeinander senkrecht, so daß bei Parallelstellung von Analysator und Polarisator das blaugrüne Licht eine Schwächung erfährt, bei gekreuzter Stellung dagegen das rote Licht. In erster Stellung erscheint daher das durchgehende

Licht hell gelblichrot, in der zweiten hellblau.

Die große Bedeutung des Viertelwellenlängenplättchens zur Beurteilung einer Lichtart beruht auf der Anwendung zur Bestimmung des elliptisch polarisierten Lichtes. Beobachten wir elliptisch polarisiertes Licht durch einen Analysator und drehen diesen, so finden wir eine Stellung, in der größte Helligkeit eintritt. Dann steht die Schwingungsebene des Analysators, die nach Fresnel senkrecht zu seiner Polarisationsebene angenommen ist, parallel der großen Achse der Ellipse. Schalten wir jetzt ein Viertelwellenlängenplättchen vor den Analysator und orientieren es so, daß die Schwingungsebenen des Analysators mit einer der Polarisationsebenen des Plättchens zusammenfällt, so wird die eine der beiden Komponenten des elliptisch polarisierten Lichtes gegenüber der anderen um $^1/_4\,\lambda$ verschoben. Während vorher die eine Komponente ihren Maximalwert erreichte in dem Augenblick, wo die andere den Wert Null hatte, wie in Figur 3 b, erreichen jetzt beide Komponenten gleichzeitig den maximalen Wert wie in Figur 3 a; d. h. aber, das elliptische Licht wird auf linear polarisiertes Licht reduziert. Drehen wir jetzt den Analysator um den Winkel α (Fig. 3 a), bis größte Helligkeit des durchdringenden Lichtes erreicht ist, oder um $90-\alpha$, bis völlige Auslöschung eintritt, so erhalten wir durch den Wert von $\operatorname{tg}\alpha$ das Verhältnis der Achsen der Ellipse. Wir würden auf diese Weise die einzelnen Fälle der Reihe von Figur 5 untersuchen und die entsprechenden Formeln nachprüfen können. Aber auch die Achsenverhältnisse der Ellipsen der Reihe von Figur 6 können auf die gleiche Weise ausgemessen werden, obwohl in dieser Reihe die elliptischen Schwingungen aus ganz anderen Phasenverschiebungen als $^1/_4\,\lambda$ heraus entstanden sind.

Die Untersuchung ganz beliebigen Lichtes mit Hilfe des $^1/_4\,\lambda$-Plättchens gestaltet sich jetzt nach dem Vorschlage von Mach folgendermaßen:

Das zu prüfende Licht wird durch einen Analysator beobachtet und es zeigt sich:

I. Beim Drehen des Analysators tritt keine Helligkeitsänderung ein.

1. Beim Vorschalten des $^1/_4\lambda$-Plättchens ist die Helligkeit bei der Drehung des Analysators auch noch ungeändert.

Alles Licht ist unpolarisiert.

2. Beim Vorschalten des $^1/_4\lambda$-Plättchens ändert sich beim Drehen des Analysators vom Minimum I_1 bis zum Maximum I_2.

a) $I_1 = 0$. Alles Licht ist zirkular polarisiert.

b) $I_1 > 0$. Zirkular polarisiertes Licht ist mit unpolarisiertem gemischt.

II. Beim Drehen des Analysators tritt Helligkeitsänderung von I_1 bis I_2 ein.

1. $I_1 = 0$. Alles Licht ist linear polarisiert.

2. $I_1 > 0$.

a) Man schaltet ein $^1/_4\lambda$-Plättchen ein und stellt seine Azimute mit denen des Analysators parallel. Beim Drehen des Analysators mit dem Plättchen wird $I_1 = 0$. Alles Licht ist elliptisch polarisiert.

b) Bei Drehung des Analysators mit dem Plättchen bleibt auch jetzt noch $I_1 > 0$.

α) Stellt man den Analysator jetzt auf Minimum der Helligkeit und entfernt das Plättchen, so ist der Analysator auch jetzt noch auf Minimum eingestellt

Das Licht ist teilweise polarisiert, teilweise unpolarisiert.

β) Nach Entfernen des $^1/_4\lambda$-Plättchens muß der Analysator gedreht werden, um wieder minimale Helligkeit zu erzielen.

Das Licht ist teilweise elliptisch polarisiert, teilweise unpolarisiert.

Außer dieser Analyse des Lichtes, die nur das Vorhandensein elliptischer Polarisation nachweist und deren Achsenverhältnis bestimmt, kommen Fälle vor, in denen das zur Untersuchung gelangende Licht auf 2 bestimmte zueinander senkrechte Komponenten bezogen werden soll, und die Phasendifferenz zu bestimmen ist, mit denen 2 polarisierte Strahlen in den Richtungen dieser Komponenten schwingen müssen, um das untersuchte Licht zu ergeben. Dieser Fall liegt z. B. vor bei der in Figur 6 dargestellten Reihe von Totalreflexionen und auch bei der Metallreflexion. In diesen Fällen erscheint das reflektierte Licht aus 2 Komponenten zusammengesetzt, die in der Einfallsebene und senkrecht dazu schwingen. In diesem Falle ist ein Kompensator erforderlich, der gestattet die Phasendifferenz wieder aufzuheben, so daß die

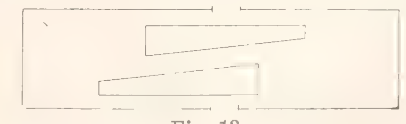


Fig. 13.

Komponenten sich dann in unveränderter Größe zu linear polarisiertem Licht zusammensetzen. Die Resultierende aus diesen Komponenten heißt dann das „wiederhergestellte" polarisierte Licht Ein solcher Kompensator ist der Babinetsche Kompensator, dessen wesentlichen Teil 2 keilförmige Quarzplatten bilden (Fig. 13). Beide Platten sind parallel zur optischen Achse aus dem Quarz geschnitten, jedoch

liegt in der einen die optische Achse parallel zur Keilkante in der anderen senkrecht dazu. Eine der Platten ist verschiebbar angeordnet, so daß beim Verschieben derselben das Ganze ein System veränderlicher Dicke darstellt. Das Ganze ist in einer Metallfassung untergebracht, die gegenüber der Mitte der festen Platte beiderseits eine schmale Oeffnung freiläßt. Das Licht, das durch diese Oeffnungen hindurchgeht, durchsetzt in der festen Platte stets dieselbe Dicke, in der beweglichen, je nach der Stellung dieser Platte eine verschiedene Dicke. Nun sind in den beiden Platten infolge der Lagen der Achsen ordentlicher und außerordentlicher Strahl miteinander vertauscht. Stehen beide Platten daher mit den Mitten einander gegenüber, so wird die Phasendifferenz beider Strahlen, die in der ersten Platte entsteht, in der zweiten wieder aufgehoben; es resultiert die Differenz 0. Verschiebt man die eine Platte, so entsteht eine Phasendifferenz entsprechend der Differenz der Dicken der beiden Platten, und man ist so in der Lage, eine ganz beliebige Phasendifferenz herzustellen. Um den Kompensator zu benutzen, muß man noch den Wert der Phasendifferenz kennen, der den verschiedenen Plattenstellungen entspricht. Diese Bestimmung ist aber leicht auszuführen nach folgender Ueberlegung. Stellt man die Polarisationsebene eines Polarisators unter 45° gegen die Horizontale geneigt, und den Analysator um 90° dagegen gedreht und bringt zwischen beide den Kompensator, so daß die Verschiebung der beweglichen Platte horizontal erfolgt, so muß das Gesichtsfeld dunkel sein, wenn die Mitten beider Platten sich decken. Verschiebt man jetzt die bewegliche Platte, so ist die Phasendifferenz $^1/_4\lambda$ daran kenntlich, daß bei ihr Drehen des Analysators eine Helligkeitsänderung nicht mehr bewirkt. Verstellt man den Kompensator weiter, so erreicht man weiter eine Stellung, bei der eine Drehung des Analysators um 90° aus der Anfangsstellung wieder Dunkelheit bewirkt; dann ist eine Phasendifferenz von $^1/_2\lambda$ vorhanden. In gleicher Weise sind die Phasendifferenzen $^3/_4\lambda$, λ, 2λ, usw. leicht zu erkennen; das Instrument ist dadurch leicht zu kalibrieren. Bei gut geschliffenen Platten müssen die von der Mittellage aus gemessenen Größen der Verschiebungen den entstehenden Phasendifferenzen proportional sein.

5. **Drehung der Polarisationsebene.** Einige meist optisch einachsige Kristalle zeigen, wenn sie von polarisiertem Lichte in der Richtung einer optischen Achse durchsetzt werden, also in der Richtung, in der sie eine Zerlegung des Strahls in 2 Teile nicht zeigen sollen (vgl. den Artikel „Doppelbrechung"), trotzdem einen Einfluß auf die Polarisationsebene. Das bekannteste Beispiel hierfür bildet der Quarz. Wird eine Quarzplatte, die senkrecht zur optischen Achse aus dem Kristall geschnitten ist, von polarisiertem, monochromatischem Licht durchsetzt, so zeigt sich die Polarisationsebene des austretenden Strahls gegenüber der des eintretenden Strahls um einen bestimmten Winkel gedreht. Hatte man Polarisator und Analysator in gekreuzten Stellungen aufgestellt, so daß das Gesichtsfeld dunkel war, so bringt die dazwischen gestellte Quarzplatte Aufhellung des Gesichtsfeldes hervor, und der Analysator muß um einen bestimmten Winkel gedreht werden, um wieder Dunkelheit zu erhalten. Dieser Winkel mißt die Drehung der Polarisationsebene. Mußte der Analysator im Sinne des Uhrzeigers, vom Beobachter aus gesehen, gedreht werden, so sprechen wir von einer Rechtsdrehung der Polarisationsebene; im entgegengesetzten Falle von einer Linksdrehung. Es gibt sowohl rechtsdrehenden Quarz als auch linksdrehenden; auch bei anderen Kristallen findet sich die gleiche Erscheinung, daß die einen Individuen derselben Kristallsubstanz rechts drehen, die anderen links. Aeußerlich macht sich dies auch schon an der Kristallform dadurch bemerkbar, daß zwei solche entgegengesetzt drehende Individuen nicht einander ähnliche Anordnung der Begrenzungsflächen haben, sondern zueinander symmetrisch sind.

Optisch einachsige Kristalle, die die Polarisationsebene drehen, sind außer dem Quarz, besonders Zinnober, ferner schwefelsaure Doppelsalze von Kalium und Natrium, Lithium und Rubidium, Lithium und Ammonium, Kalium und Lithium, jodsaures Natrium, schwefelsaures Strychnin und manche andere.

Es gibt auch Kristalle des regulären Systems, die die Polarisationsebene drehen, und zwar drehen sie dann für jede Richtung des durchtretenden Strahls in gleichem Maße. Hierher gehören Natriumchlorat, Natriumbromat.

An optisch zweiachsigen Kristallen ist Drehung der Polarisationsebene nur sehr selten nachzuweisen. Das liegt zum Teil an der Schwierigkeit, sie in diesem Falle zu erkennen, da sie hier nur sehr genau in der Richtung der optischen Achse auftritt und schon bei sehr geringer Neigung dagegen verschwindet. Deutlich erkennbar ist sie bei Quarz, der durch seitlichen Druck zweiachsig gemacht ist.

Außer bei Kristallen findet sich eine Drehung der Polarisationsebene in einer Reihe von Lösungen, z. B. Lösungen von Zucker, Kampfer, Weinsäure, sowie von

Flüssigkeiten, z. B. Terpentinöl und vielen ätherischen Oelen.

Alle diese Substanzen werden optisch aktive Substanzen genannt und für alle haben sich folgende Gesetzmäßigkeiten in voller Strenge ergeben:

1. Die Größe der Drehung der Polarisationsebene ist der Länge der durchlaufenen Schicht (Plattendicke) genau proportional. Schaltet man mehrere Schichten hintereinander, so ist die Gesamtdrehung ebensogroß wie in einer Schicht von der Länge gleich der Summe der Einzelschichten. Durchläuft der Strahl eine Schicht und wird an ihrem Ende reflektiert, so daß er die Schicht noch einmal in entgegengesetzter Richtung durchläuft, so wird die Drehung vollständig wieder aufgehoben. Eine Drehung des aktiven Körpers um den hindurchgehenden Strahl als Achse ist ganz ohne Einfluß auf den Drehungswinkel.

2. Tritt eine Substanz in rechtsdrehender und linksdrehender Form auf, z. B. Rechtsquarz und Linksquarz, so ist für beide Formen die Größe der Drehung bei gleicher Schichtdicke genau die gleiche.

Zu diesen beiden streng gültigen Gesetzen gesellt sich ferner als dritte Beziehung hinzu:

3. Die Größe der Drehung der Polarisationsebene hängt von der Wellenlänge ab. Ist α der Drehungswinkel für eine bestimmte Dicke, so läßt sich für viele Substanzen die Abhängigkeit von der Wellenlänge mit guter Annäherung durch die Formel $\alpha = \frac{A}{\lambda^2} + \frac{B}{\lambda^4}$ darstellen, wo A und B empirisch zu bestimmende Konstanten sind. Danach nimmt also die Drehung mit abnehmender Wellenlänge sehr stark zu.

Die Abhängigkeit der Drehung der Polarisationsebene von der Farbe nennt man die Dispersion der Drehung und spricht von dieser als der Rotationsdispersion im Gegensatz zur gewöhnlichen Dispersion bei der Brechung (vgl. die Artikel „Lichtbrechung“ und „Lichtdispersion“). Die Rotationsdispersion verläuft in der Regel so, daß mit abnehmender Wellenlänge die Drehung stetig wächst. Es gibt aber auch Fälle anomaler Rotationsdispersion, z. B. Lösung von Weinsäure in Wasser oder Alkohol von bestimmter Konzentration. Es ist dann die Drehung für eine bestimmte Farbe ein Maximum und sowohl für größere als auch für kleinere Wellen geringer.

An Stelle der Formel $\alpha = \frac{A}{\lambda^2} + \frac{B}{\lambda^4}$, die von Boltzmann stammt, sind von anderen Forschern auch andere Beziehungen aufgestellt, die einzelnen der Erfahrungsdaten sich ebensogut anpassen. Lommel gibt die Formel $\alpha = \frac{a\lambda^2}{(\lambda^2 - \lambda^2_0)}$, wo a und λ_0 Konstante sind und Stefan schreibt:

$$\alpha = A + \frac{B}{\lambda^2}.$$

Die Formel von Lommel schließt sich in der Form der Ketteler-Helmholtzschen Formel für die gewöhnliche Dispersion an, die Stefansche Formel der entsprechenden von Cauchy, so daß in diesen Formeln eventuell der Weg zu einer theoretischen Begründung der Rotationsdispersion gefunden werden kann, während die Boltzmannsche Formel rein empirisch gefunden ist; Biot benutzte nur das erste Glied dieser Formel und Gumlich hat noch ein drittes Glied $\frac{C}{\lambda^6}$ hinzugefügt.

Das Vorhandensein der Rotationsdispersion bewirkt, daß bei Anwendung von weißem Licht beim Zwischenschalten eines aktiven Körpers das Gesichtsfeld bei keiner Stellung des Analysators vollkommen dunkel sein kann. Der Analysator kann immer nur für einzelne bestimmte Wellenlängen völliges Auslöschen des Lichtes bewirken, die anderen Wellenlängen müssen mehr oder weniger geschwächt bestehen bleiben und daher ein gefärbtes Gesichtsfeld bewirken. Beispielsweise dreht eine Quarzplatte von 3,75 mm Dicke gelbes Licht gerade um 90°. Für die einzelnen Fraunhoferschen Linien beträgt die Drehung für B C D E F G H Drehungswinkel 58,12° 64,46° 81,71° 104,06° 123,94° 159,67° 191,81°.

Stehen daher Polarisator und Analysator parallel, so muß das gelbe Licht zwischen D und E ganz ausgelöscht werden. Im Gesichtsfeld entsteht daher ein Gemisch von Strahlen aus dem roten und dem blauen Ende des Spektrums. Dreht man jetzt den Analysator oder den Polarisator ein wenig aus der Parallelstellung heraus, so wird in dem Farbengemisch sofort das eine Ende des Spektrums überwiegen, die Mischfarbe also mehr nach rot ober nach blau hin gefärbt sein. Da unser Auge für die Wahrnehmung dieses Ueberwiegens von rot oder blau sehr empfindlich ist, nennt man die Mischfarbe, die ein Quarz von 3,75 mm Dicke zwischen parallelen Nicols gibt, auch die empfindliche Uebergangsfarbe.

Eine Quarzplatte von doppelter Dicke, also von 7,50 mm, muß zwischen gekreuzten Nicols sehr nahe die gleiche Mischfarbe geben, denn dann werden die um 180° gedrehten Strahlen ausgelöscht, und dies sind wieder die Strahlen zwischen D und E. In diesem Falle werden aber auch noch die Strahlen zwischen G und H, die jetzt um 360° gedreht sind, ausgelöscht. Diese sind

zwar sehr dunkel, aber immerhin muß jetzt die Mischfarbe etwas weniger Blau enthalten.

Zerlegen wir die durch eine aktive, zwischen Nicols gebrachte Substanz entstandene Mischfarbe durch ein Spektroskop in ein Spektrum, so muß dies einen oder bei hinreichender Drehung der Substanz auch mehrere dunkle Streifen zeigen. Diese Streifen bedecken die Farben, für welche bei der betreffenden Analysatorstellung gerade Auslöschung erfolgt. Drehen wir jetzt den Analysator, so wandern die Streifen im Spektrum entlang und zwar, wenn wir den Analysator im Sinne der Drehung der Polarisationsebene drehen, so wandern die dunklen Streifen in der Richtung vom roten Ende nach dem blauen hin. Dies Beobachten des Wanderns der Streifen im Spektrum ist zugleich das einfachste Mittel, um den Drehungssinn der Polarisationsebene festzustellen, denn wenn bei monochromatischem Licht eine Drehung des Analysators um 90° aus seiner Anfangsstellung wieder Dunkelheit hervorruft, so kann man daraus allein noch nicht erkennen, ob die wirkliche Drehung 90° nach der einen oder 270° nach der anderen Seite betrug. Das Wandern der Streifen im Spektrum beim Drehen des Analysators unterscheidet die Farbenerscheinungen der Rotationsdispersion ganz charakteristisch von anderen Farben, die durch eine nicht aktive Kristallplatte unter sonst gleichen Verhältnissen hervorgerufen werden können (vgl. den Artikel „Doppelbrechung").

Die Erklärung der Drehung der Polarisationsebene in Kristallen ist nach Fresnel darin zu finden, daß in derjenigen Richtung im Kristall, in welcher die Drehung zu beobachten ist, das den Kristall durchsetzende Licht in 2 Teile zerlegt ist, die beide zirkular polarisiert sind und von denen der eine sich schneller fortpflanzt als der andere. Jeden linear polarisierten Strahl kann man sich stets aus 2 zirkularpolarisierten zusammengesetzt denken, wie durch die Figur 14 deutlich gemacht werden kann. Es stellt hier die Figur a einen rechtsherum schwingenden und b einen linksherum schwingenden zirkularen Strahl dar; die Pfeile bedeuten die Bewegungszustände der rechtwinkligen Komponenten dieser Strahlen in dem Augenblick, wo die vertikale Komponente ein Maximum ist. Denken wir uns nun die beiden zirkularen Strahlen zusammengelegt, so heben sich die horizontalen Komponenten gerade auf, während die vertikalen Komponenten sich zu einem in der Vertikalen linear schwingenden Strahl addieren. Ist jetzt der zweite Strahl in einer anderen Phase, so können wir uns dies dadurch darstellen, daß wir die Figur 14a um einen entsprechenden Winkel gedreht denken. Legen wir sie dann mit Figur 14b zusammen, so entsteht Figur 14c. Es läßt sich dann stets ein Achsenkreuz AB so legen, daß es die Richtungen zwischen den Komponenten der Teilstrahlen halbiert. Zerlegen wir die Komponenten jetzt nach diesem neuen Achsenkreuz, so sehen wir, daß in bezug auf die eine Achse sich die Komponenten gerade aufheben, während sie sich in bezug auf die andere addieren. Letzteres ist dann die Schwingungsebene des aus beiden zirkularen Strahlen entstehenden linear polarisierten Strahls. In einem aktiven Kristall würde also nach Fresnel wirklich beim Eintritt eine Zerspaltung des Strahls in 2 zirkulare Strahlen, wie sie oben nur graphisch als möglich dargestellt ist, eintreten, die sich beim Verlassen des Kristalls wieder zu einem linearen zusammensetzen, aber jetzt mit veränderter Polarisationsebene, weil infolge der ungleichen Fortpflanzungsgeschwindigkeit jetzt eine Phasendifferenz zwischen beiden Strahlen eingetreten ist. Die Lichtausbreitung im Innern eines Kristalls würde daher so verlaufen, daß in den Richtungen, die zu den optischen Achsen geneigt sind, 2 linear polarisierte Strahlen auftreten (vgl. den Artikel „Doppelbrechung"); nähert sich jedoch die Strahlrichtung einer der optischen Achsen, so wird die lineare Polarisation zu einer elliptischen und beim Zusammenfallen mit der optischen Achse des Kristalls entsteht Zirkularpolarisation. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des außerordentlichen Strahls ist nun von der Strahlrichtung abhängig; ändert sie sich so, daß sie in der Richtung der optischen Achse mit der des ordentlichen Strahls gleich wird, so entsteht keine Drehung der Polarisationsebene; bleibt sie ungleich mit dieser, so entsteht Drehung.

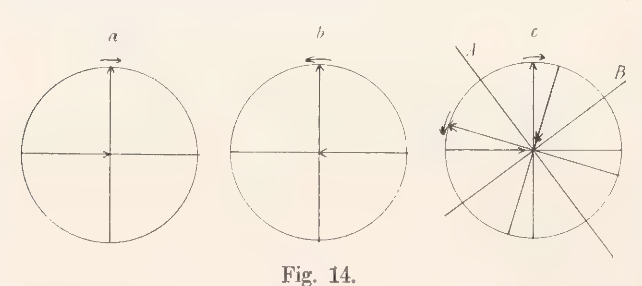


Fig. 14.

Daß wirklich in der optischen Achse des Quarzes zwei Strahlen verschiedener Fortpflanzungsgeschwindigkeit existieren, ist schon von Fresnel durch folgenden Versuch er-

wiesen. Ein rechtsdrehendes Quarzprisma von 152° brechendem Winkel ist mit zwei linksdrehenden so verkittet, daß die Endflächen der letzteren zur Symmetrieachse des mittleren Prismas senkrecht stehen (Fig. 15). In der Richtung dieser Symmetrieachse liegen zugleich die optischen Achsen in allen 3 Prismen. Tritt jetzt in der Richtung der optischen Achse ein Strahl in das erste Prisma ein, so werden seine beiden Bestandteile wegen der ungleichen Fortpflanzungs-



Fig. 15.

geschwindigkeit, und deswegen auch ungleichen Brechungsindex, an der ersten und zweiten Grenzfläche, sowie auch beim Austritt in die Luft, jedesmal in ihrer Richtung stärker divergent gemacht, so daß schließlich 2 Strahlen von ungleicher Richtung austreten. Beide erweisen sich als völlig unempfindlich gegenüber der Stellung eines Analysators, müssen also zirkular polarisiert sein. Ist das eintretende Licht von vornherein zirkular polarisiert in nur einer Drehungsrichtung, so wird es in dieser Prismenkombination auch nicht mehr in 2 Teile zerlegt.

Läßt man in ein rechtwinkliges Quarzprisma, bei dem die optische Achse senkrecht zur einen Kathetenfläche ist, einen Strahl senkrecht zu dieser Fläche, also in der Richtung der optischen Achse einfallen, so spaltet er sich beim Austritt aus der Hypotenusenfläche in 2 in etwas verschiedener Richtung verlaufende Strahlen, ein Beweis dafür, daß auch der in der optischen Achse verlaufende Strahl aus 2 Teilen von verschiedenem Brechungsindex besteht. Dementsprechend wird ein jedes Quarzprisma, auch wenn seine optische Achse zur Halbierungslinie des brechenden Winkels senkrecht steht, und der Strahl im Minimum der Ablenkung hindurchgeht, Doppelbilder ergeben, die bei feineren Beobachtungen stören müssen. Man vermeidet die Doppelbilder nach dem Vorgange von Cornu, indem man das Prisma aus 2 Hälften zusammensetzt, einer rechtsdrehenden und einer linksdrehenden.

Die Erklärung der Drehung der Polarisationsebene in Flüssigkeiten und Lösungen ist ebenfalls in der Zerlegung des Strahls in 2 entgegengesetzt zirkular polarisierte Teile von ungleicher Fortpflanzungsgeschwindigkeit zu suchen. Während bei Kristallen in der Kristallsymmetrie selbst die Ursache der ungleichen Beeinflussung der Lichtstrahlen in den verschiedenen Richtungen zu suchen ist, müssen wir bei Flüssigkeiten annehmen, daß bereits in den Molekülen selbst die entsprechenden Symmetrieverhältnisse auftreten, während die Moleküle untereinander regellos gemischt sind. Nach van't Hoff und Le Bel findet sich in der Tat optische Aktivität in organischen Flüssigkeiten nur bei Anwesenheit eines asymmetrischen Kohlenstoffatoms im Molekül, d. h. eines Atoms, dessen 4 Valenzen durch 4 verschiedene Radikale gesättigt sind, die man sich an den 4 Ecken eines Tetraeders angebracht denken kann, in dessen Mitte das Kohlenstoffatom sich befindet.

Durch eine ähnliche Kombination von 3 Prismen, wie Fresnel beim Quarz benutzte, ist es Fleischl auch gelungen, den Nachweis der Zerlegung der Strahlen in 2 zirkulare in optisch aktiven Flüssigkeiten experimentell zu erbringen.

Vollständige mathematische Theorien für die Drehung der Polarisationsebene sind von den verschiedenen Lichttheorien aus entwickelt worden. Drude hat diese Entwickelungen auf Grund der elektromagnetischen Auffassung des Lichtes gegeben. Der Grundgedanke dabei ist der, daß die Bewegung eines elektrischen Teilchens (Elektrons) nicht allein durch die an seinem Orte herrschende Kraft X, Y, Z bestimmt ist, sondern daß die Kraftverteilung in der Umgebung, also die Differentialquotienten $\frac{\partial X}{\partial x}, \frac{\partial X}{\partial y}, \frac{\partial X}{\partial z}, \frac{\partial Y}{\partial x}$ usw. mitbestimmend sind. Dadurch treten an Stelle der einfachen Glieder $\frac{dX}{dt}, \frac{dY}{dt}, \frac{dZ}{dt}$, in den Maxwellschen Gleichungen (siehe unter 2 „Fresnels Reflexionsformeln") die erweiterten Formeln

$$\frac{d}{dt}\left(X + f\left(\frac{dY}{dz} - \frac{dZ}{dy}\right)\right)$$

und entsprechend für Y und Z. Von diesen Gleichungen aus wird dann Drude ebenfalls zu der Zerlegung des Lichtes in 2 zirkular polarisierte Strahlen ungleicher Fortpflanzungsrichtung geführt.

Um das optische Drehungsvermögen verschiedener Substanzen bequemer vergleichen zu können, hat man noch den Begriff des spezifischen Drehungsvermögens $[\alpha]$ aufgestellt. Dasselbe berechnet sich nach der Formel $[\alpha] = \frac{\alpha}{l\,d}$; hier bedeutet l die Länge der vom Licht durchlaufenen Substanz in Dezimetern, α den bei dieser Länge beobachteten Drehungswinkel und d die Dichte der Substanz. In diesem Sinne ist das spezifische Drehungsvermögen von Quarz 830° für gelbes Licht (D-Linie). Zuckerlösung 66°. Diese Größe ändert sich jedoch ein wenig mit der Konzentration und dem Lösungsmittel. Nach Landolt ist im allgemeinen $[\alpha] = A + Bq + Cq^2$, wo q die in 100 Gewichtsteilen Lösung enthaltene Gewichtsmenge des Lösungsmittels ist, und A, B, C Konstanten sind.

Näheres über die Bedeutung dieser Verhältnisse für chemische Probleme siehe unter dem entsprechenden Abschnitt der physikalischen Chemie.

Man kann die Drehung der Polarisationsebene auch künstlich hervorrufen durch Uebereinanderlegen von Gips- oder Glimmerplättchen in geeigneter Anordnung (Versuche von Reusch). Die einfachste Form hierfür ist folgende: Hinter dem Polarisator kommt zunächst ein Viertelwellenlängenplättchen in solcher Lage, daß seine Achsen unter 45° gegen die des Polarisators liegen; dann folgt ein Gipsplättchen von solcher Dicke, daß es in parallelem Licht noch gute Farben gibt (vgl. den Artikel über „Doppelbrechung"). Seine Achsen liegen wieder unter 45° gegen die des $^1/_4\lambda$-Plättchens und schließlich kommt noch ein $^1/_4\lambda$-Plättchen in derselben Orientierung wie das untere $^1/_4\lambda$-Plättchen. Ist jetzt a (Fig. 16) die Schwingungs-

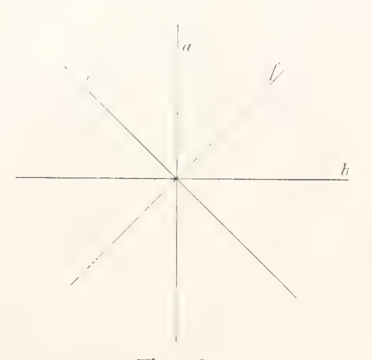


Fig. 16.

ebene des Polarisators, so wird ein Strahl der in der a-Ebene polarisiert ist, im ersten $^1/_4\lambda$-Plättchen in 2 Komponenten zerlegt nach c und f, die eine Phasendifferenz von $^1/_4\lambda$ haben. Jede dieser beiden Komponenten wird im Gipsplättchen wieder in 2 Komponenten nach a und b zerlegt; wir erhalten also 2 in a und 2 in b schwingende Anteile. Jedes dieser Paare setzt sich zu einem linear polarisierten Strahl zusammen. Erreichen diese beiden Strahlen das zweite $^1/_4\lambda$-Plättchen, so wird jeder von ihnen in einen zirkular polarisierten Strahl umgewandelt und zwar zeigt eine einfache Ueberlegung, daß der eine Strahl rechtszirkular, der andere linkszirkular ist. Da beide außerdem eine Phasenverschiebung gegeneinander haben, so ist das schließliche Ergebnis genau das gleiche wie bei einer einfachen Drehung der Polarisationsebene. Man kann derartige Versuche noch mannigfach modifizieren und erhält stets eine Drehung der Polarisationsebene, wenn man eine größere Zahl von Glimmerplättchen gleicher Dicke so übereinander lagert, daß die Schwingungsebene des einen Plättchens gegen die des vorhergehenden stets um den gleichen Winkel (30° oder 45° oder 60°) und im gleichen Sinne gedreht sind. Die dann erzielte Drehung der Polarisationsebene ist stets entgegengesetzt gerichtet der Winkeldrehung, in der die Plättchen aufeinander gelegt sind.

Auf Grund der Ergebnisse solcher Versuche ist wiederholt, besonders aber von Sohncke, versucht worden, das Zustandekommen der 2 zirkular polarisierten Strahlen in aktiven Kristallen aus dem schichtenweisen Aufbau der Kristallstruktur herzuleiten.

6. Instrumente zur Messung der Drehung der Polarisationsebene. Bei der großen Wichtigkeit, die das optische Drehungsvermögen zur Unterscheidung und Bestimmung mancher chemischen Substanzen besitzt, sind eine Reihe verschiedener Instrumente konstruiert worden, um die Messung des Drehungswinkels mit möglichster Sicherheit auszuführen. Diese Instrumente werden auch „Polaristrobometer" genannt. Das allgemeine Prinzip in ihrer Anordnung ist stets das gleiche. Das Licht einer geeigneten, für viele Zwecke monochromatischen Lichtquelle fällt der Reihe nach durch den Polarisator, die zu prüfende Substanz und den Analysator. Zu diesen 3 Grundbestandteilen kommen dann noch Linsen und Blenden, lediglich zu dem Zweck, das verfügbare Licht möglichst gut auszunutzen und ein gut und gleichmäßig beleuchtetes Gesichtsfeld zu erzielen, und weiter besondere Hilfsapparate, um die Empfindlichkeit der Ablesung zu steigern. Die zu untersuchenden Flüssigkeiten werden dabei in Glasröhren von genau 1 oder 2 dm Länge gebracht, die durch Planplatten verschlossen werden.

Mit der einfachsten Anordnung ganz ohne Linsen und Hilfsapparate hat sich noch Biot begnügt. Er blickte einfach durch den Analysator (Nicol), die zu untersuchende Substanz und den Polarisator (achromatisches Kalkspatprisma) nach der Lichtquelle hin und drehte den Analysator so, daß größte Dunkelheit eintrat. Die Drehung des Analysators konnte an einem Teilkreis abgelesen werden.

Eine für feinere wissenschaftliche Messungen bestimmte Anordnung hat Lippich angegeben (Fig. 17). Ein Kollimatorrohr trägt einen ½ mm breiten vertikalen Spalt und die Linse L_1. Das einfallende Licht wird durch L_1 parallel gemacht und durchsetzt jetzt die Nicols N_1 und N_2 mit der dazwischen angeordneten zu prüfenden Substanz. Dann wird das Licht durch die Linse L_2 wieder konvergent gemacht und entwirft in der Ebene B ein Bild des Spaltes, das durch das Okular O beobachtet wird. Es

lassen sich jetzt stets die Nicols so stellen, daß der bei gekreuzten Nicols auftretende Landoltsche dunkle Streifen (vgl. Fig. 10b) horizontal quer durch das Spaltbild geht. Eine sehr geringe Drehung der Polarisationsebene, bevor das Licht den Analysator erreicht, läßt den Streifen sofort nach oben oder unten wandern. Durch einen mikrometrisch verschiebbaren horizontalen Doppelfaden kann die Größe der Wanderung des Streifens sehr genau ausgemessen werden. Man kann auf diese Weise schon Drehungen von 1—3 Sekunden messen. Bei größeren Drehungen geht der dunkle Streifen ganz aus dem Gesichtsfeld heraus und muß durch Drehung des Analysators wieder zurückgebracht werden. Dann wird der Drehungswinkel am Teilkreis des Analysators abgelesen. Bei großen Drehungen stellt sich dann aber der Landoltsche Streifen schief und die Einstellungsgenauigkeit verliert dann sehr und ist schließlich der einfachen Biotschen Anordnung nicht mehr überlegen. Der Apparat kann natürlich nur mit monochromatischem Licht gebraucht werden.

Da die Einstellung auf größte Dunkelheit bei gekreuzten Nicols keine große Genauigkeit ergibt, hat Wild in seinem Polaristrobometer die Quarzdoppelplatte des Savartschen Polariskops (vgl. S. 324) angebracht. Diese Platte steht so hinter dem Polarisator, daß ihre optischen Achsen mit der Polarisationsebene des Polarisators 45° bilden. Dann folgt die Substanzröhre und der Analysator. Da die Streifen im Savartschen Polariskop nun am schärfsten gesehen werden, wenn man in unendliche Ferne blickt, so ist hinter dem Analysator noch ein kleines auf Unendlich eingestelltes Fernrohr angebracht, mit dem man jetzt durch die ganze Anordnung hindurchsieht. Die Interferenzstreifen werden dann sichtbar, wenn die Nicols gekreuzt oder parallel stehen, dazwischen gibt es 2 Stellungen, bei denen die Streifen verschwinden. Tritt durch Zwischenschalten einer drehenden Substanz eine Drehung der Polarisationsebene ein, so treten die Streifen wieder auf und man stellt durch Drehen eines Nicols auf Verschwinden der Streifen ein. Die Drehung wird von einem Teilkreis abgelesen und entspricht dem gesuchten Drehungswinkel. Auch hier ist monochromatisches Licht nötig.

Um mit weißem Licht, das im allgemeinen leichter in größerer Intensität zur Verfügung steht als monochromatisches Licht (Natriumflamme) arbeiten zu können, hat Soleil zur feineren Erkennung der richtigen Einstellung des Analysators eine Quarzdoppelplatte konstruiert, die aus einem rechts- und einem linksdrehenden Quarz zusammengesetzt ist, in der Weise, daß beide nebeneinander liegen und in einer feinen Linie in der Mitte des Gesichtsfeldes zusammenstoßen und so dieses in zwei gleiche Hälften teilen. Beide sind 3,75 mm dick und ergeben dadurch die „empfindliche Uebergangsfarbe" (vgl. S. 327). In der Nullstellung des Analysators, d. h. der Parallelstellung mit dem Polarisator

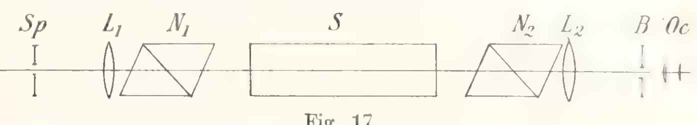
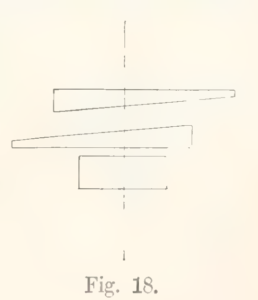


Fig. 17.

erscheinen dann beide Hälften des Gesichtsfeldes gleich gefärbt. Eine geringe Drehung der Polarisationsebene durch Zwischenbringen einer aktiven Substanz bewirkt eine ungleiche Färbung beider Hälften, die durch Drehen des Analysators wieder ausgeglichen wird. Da in diesem Apparat die Trennungslinie beider Hälften der Doppelplatte scharf gesehen werden muß, ist hinter dem Analysator noch ein kleines (galileisches) Fernrohr angebracht, das auf die Doppelplatte scharf eingestellt wird.

Soleil hat ferner auch noch die Drehung des Analysators ersetzt durch einen besonderen Kompensator. Dieser besteht aus 2 gegeneinander verschiebbaren keilförmigen Quarzplatten (Fig. 18), die aber so geschnitten sind, daß die optische Achse senkrecht zur Ebene der Platten steht. Diese Anordnung ist nicht mit Babinets Kompensator zu verwechseln. Durch die Verschiebbarkeit der Platten gegeneinander stellt das Ganze eine Platte variabler Dicke dar. Diese beiden Keile sind beide aus gleichdrehendem Quarz geschnitten, etwa beide aus rechtsdrehendem; beiden ist dann eine andere aus linksdrehendem Quarz vorgeschaltet von einer Dicke, die gleich der Dicke der beiden anderen zusammen in ihrer mittleren Stellung ist. Ein polarisierter Lichtstrahl, der das Ganze durchsetzt, erhält dann keine Drehung, da die in der ersten Platte erhaltene Drehung durch die Quarzkeile gerade wieder aufgehoben wird. Sowie man aber die Quarzkeile gegeneinander verstellt, kann man dem Lichtstrahl jede beliebige Drehung geben. Die durch irgendeine Substanz hervor-


Fig. 18.

gerufene Drehung kann man daher durch geeignetes Verstellen an diesem Kompensator wieder aufheben. Die Stellung der Quarzkeile gegeneinander kann an einer Skala mit Nonius sehr genau abgelesen werden und wenn diese einmal auf Drehungswinkel kalibriert ist, kann man durch die Ablesungen an diesem Soleilschen Kompensator die Drehungen des Analysatornicols vollständig ersetzen.

Der Soleilsche Apparat arbeitet mit weißem Licht und ist daher sehr bequem bei farblosen Substanzen, deren Rotationsdispersion annähernd die gleiche ist wie beim Quarz. Dies ist bei klaren Zuckerlösungen der Fall. Sind die Substanzen jedoch gefärbt oder ist die Dispersion wesentlich anders, so ist die empfindliche Färbung gestört und die Einstellung weniger gut auszuführen. Für diesen Fall ist in dem Saccharimeter von Ventzke-Soleil zwischen Lichtquelle und Polarisator noch ein Nicol und eine senkrecht zur Achse geschliffene Quarzplatte. Dieser Nicol mit der Quarzplatte und dem Polarisatornicol geben gefärbtes polarisiertes Licht, wie es doppelbrechende Kristallplatten passender Dicke zwischen 2 Nicols stets hervorrufen, durch Drehen des ersten Nicols mit der Platte kann man die Färbung des Lichtes in weiten Grenzen verändern und so für jede Einstellung den günstigsten Farbenton heraussuchen.

Aber auch nach dieser Verbesserung bleibt das Arbeiten mit einem solchen Instrument bei stark wechselnden Färbungen recht ermüdend; daher sind für solche Zwecke Apparate mit ungefärbten Gesichtsfeldern vorzuziehen. Ein solcher Apparat ist das Halbschattenpolarimeter von Laurent. In diesem Instrument ist das Gesichtsfeld zur Hälfte mit einer Quarzplatte bedeckt, die parallel zur optischen Achse geschnitten und so dick ist, daß eine Phasendifferenz von $^1/_2\lambda$ für beide Strahlen entsteht.

Das Gesichtsfeld ist also wieder in zwei Hälften geteilt und die optische Achse ist

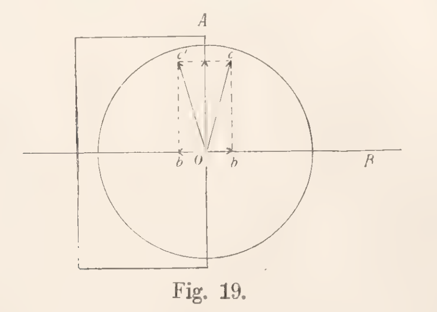


Fig. 19.

parallel der Trennungslinie oA der beiden Hälften (Fig. 19). Ist nun die Schwingungsebene des Polarisators in die Richtung oc gestellt, so tritt in der rechten, freien Hälfte des Gesichtsfeldes das Licht ungestört hindurch. In der linken Hälfte erfährt jedoch die horizontale Schwingungskomponente eine Verschiebung um $^1/_2\lambda$, so daß sie aus ob zu ob′ wird. In der linken Hälfte des Gesichtsfeldes erhält also das Licht die Schwingungsrichtung oc′, während sie rechts oc geblieben ist. Wird die Schwingungsrichtung im Analysator horizontal gestellt, so erscheinen beide Hälften gleich hell. Schaltet man jetzt eine aktive Substanz ein, so wird die eine Hälfte des Gesichtsfeldes heller, die andere dunkler, wodurch schon sehr geringe Drehungswinkel wahrnehmbar werden. Durch Drehen des Analysators kann man die Gleichheit wieder herstellen und vom Analysatorteilkreis den Drehungswinkel ablesen. Indem man den Winkel Aoc verschieden groß wählt, kann man die Helligkeit des Gesichtsfeldes der verfügbaren Lichtquelle anpassen. Die Empfindlichkeit wird um so größer, je spitzer Aoc wird, dann ist aber auch eine um so hellere Lichtquelle erforderlich. Auch dies Laurentsche Instrument ist nicht ganz unabhängig von der Farbe, da die Quarzplatte nur für eine Wellenlänge genau die Phasendifferenz $^1/_2\lambda$ hervorrufen kann. Die Empfindlichkeit gegen einseitige Färbungen ist aber wesentlich geringer wie bei der Doppelplatte von Soleil.

Ganz unempfindlich gegen die Färbung der untersuchten Substanz sind die Polaristrobometer, in denen die Verschiedenheiten in den beiden Hälften des Gesichtsfeldes nur durch Nicolsche Prismen hervorgerufen werden. Das genaueste und vollkommenste Instrument dieser Art ist das Halbschattenpolarimeter von Lippich, dessen Anordnung durch Figur 20 dargestellt ist.

Hier ist hinter dem großen Polarisator Nicol N_1 ein kleiner Nicol N_2 angeordnet, der nur die Hälfte des Gesichtsfeldes ausfüllt; er ist ein klein wenig geneigt, so daß seine untere Vorderkante eine sehr scharfe Grenzlinie zwischen beiden Hälften bildet. Das Gesichtsfeld ist begrenzt durch die Blende D_1, auf die das kleine Fernrohr F eingestellt ist. Sind beide Nicols genau parallel gestellt, so wird der Analysator N_3 das ganze Gesichtsfeld gleichmäßig verdunkeln; ist jedoch der eine von ihnen ein klein wenig ½ bis 3° gegen den anderen verdreht, so wird stets nur eine Hälfte des Gesichtsfeldes zurzeit völlig dunkel sein. Zwischen diesen beiden Stellungen für den Analysator liegt dann aber eine Stellung, in der beide Hälften gleich erscheinen. Diese Stellung gilt als Nullstellung. Einschalten einer aktiven Substanz hellt die eine Hälfte des Gesichtsfeldes auf und verdunkelt die andere. Die Gleichheit ist durch

Drehen des Analysators wieder herzustellen. Je kleiner der Winkel zwischen N_1 und N_2 ist, desto größer wird auch hier die Empfindlichkeit, doch ist eine desto stärkere Licht-



Fig. 20.

quelle erforderlich, es läßt sich dann bis auf 2″ einstellen. Bei starken Drehungen kann man diese große Empfindlichkeit jedoch nicht ausnutzen, da die Rotationsdispersion dann stört, doch erreicht man auch dann noch eine Genauigkeit von etwa 20″. Sonst noch zu fürchtende Fehlerquellen sind vermieden dadurch, daß für alle Fälle der in diesem Falle sehr breite Landoltsche Streifen, der eine ungleiche Helligkeit im Gesichtsfeld bewirken würde, in der Mitte parallel der Trennungslinie im Gesichtsfeld liegt, so daß zu beiden Seiten unmittelbar neben der Trennungslinie jedenfalls gleiche Verhältnisse vorliegen. Ferner ist bei D_2 unmittelbar vor dem Analysator noch eine Blende angebracht und vor dem Polarisator eine Beleuchtungslinse. Diese soll von der Lichtquelle in D_2 ein Bild entwerfen. Das Okular des kleinen Fernrohrs ist ferner ein ziemlich starkes, so daß dessen Okularkreis klein wird, merklich kleiner als die Pupille des beobachtenden Auges. Dadurch wird erreicht, daß nicht durch die Augenpupille Strahlenabblendungen eintreten. Auf diese Weise ist die Strahlenbegrenzung der wirksamen Lichtstrahlen durch das Instrument fest gegeben und Schwankungen in der Helligkeitsverteilung in der Lichtquelle rufen keine Störungen mehr hervor.

Auch dieses Lippichsche Halbschattenpolarimeter ist noch weiter vervollkommnet worden, indem durch Anbringung von zwei kleinen Nicols anstatt des einen N_2 das Gesichtsfeld in drei Teile geteilt wurde. Lummer hat schließlich noch einen weiteren Nicol hinzugefügt und 4 Felder erhalten. Diese Erweiterungen bringen jedoch in den Polarisationsverhältnissen nicht prinzipiell Neues, sondern erhöhen nur die photometrische Empfindlichkeit, indem besonders die Lummersche Anordnung das Kontrastprinzip der Photometrie (vgl. den Artikel „Photometrie“) auch für diesen Zweck nutzbar macht.

Literatur. ***Wüllner,*** *Experimentalphysick 5. Aufl., Band 4. Leipzig 1899.* — ***Chwolson,*** *Lehrbuch der Experimentalphysik Band 2. Braunschweig 1905.* — ***Winkelmann,*** *Handbuch der Physik 2. Aufl., Band 6. Leipzig 1908.* — ***Müller Pouillet,*** *Lehruch der Physik 9. Aufl., Band 2. Braunschweig 1902.* — ***Drude,*** *Lehrbuch der Optik 2. Aufl. Leipzig 1906.* — ***Landolt,*** *Das optische Drehungsvermögen organischer Substanzen 2. Aufl. Braunschweig 1898.*

J. Classen.

Lichtproduktion durch Organismen.

1. Definition. 2. Verbreitung. 3. Der Vorgang der Lumineszenz. 4. Physikalische Eigenschaften des Organismenlichtes. 5. Die Bedingungen des Leuchtens. 6. Die Leuchtorgane. 7. Die Funktion der Lumineszenz.

1. Definition. Die Produktion von Licht im Lebensprozeß gehört zu den Erscheinungen der Lumineszenz, d. h. des Leuchtens unterhalb der Temperatur der Grauglut oder Rotglut.

Von den verschiedenen Formen der Lumineszenz, die die Physik kennt, kommen die der Lichtproduktion durch Kristallisationsprozesse (Kristallolumineszenz), durch Reibung (Tribolumineszenz), durch elektrische Entladung (Elektrolumineszenz) von vornherein zur Erklärung des Leuchtens der Organismen gar nicht in Betracht. Daß das Leuchten der Organismen keine Thermolumineszenz ist, d. h. veranlaßt durch schwache Erwärmung, lehren die Beobachtungen über die Temperatur der leuchtenden Organismen oder der Leuchtorgane, die keine nachweisbare Erwärmung zeigen. Die Erscheinungen der Photolumineszenz bestehen darin, daß Körper, die belichtet gewesen sind, im Dunkeln eine Zeitlang leuchten, und auch dies Phänomen kann nicht zur Erklärung der tierischen Lumineszenz herangezogen werden. So bleibt nur noch eine Gruppe von Lumineszenzphänomen, die des Leuchtens infolge chemischer Umsetzungen, die Chemolumineszenz. Eine große Anzahl von Körpern gehen Reaktionen ein, bei denen Licht auftritt, und je mehr Aufmerksamkeit den Erscheinungen der Chemolumineszenz geschenkt wurde, desto deutlicher tritt die Einsicht hervor, daß man weder für die Körper, die unter Lichterscheinungen Reaktionen eingehen, noch für die Art der Reak-

tionen in denen Licht produziert wird, allgemeine Charakteristika angeben kann.

Von den Erscheinungen der tierischen Lumineszenz, der Lichtproduktion durch Organismen, sind eine Reihe von Phänomenen zu trennen, die als „Leuchten“ bezeichnet werden, bei denen es sich aber nicht um die Produktion von Eigenlicht handelt, sondern nur darum, daß das einfallende Licht besonders stark in bestimmten Richtungen reflektiert wird, und so den Eindruck des selbständigen Leuchtens vortäuscht. Die bekanntesten derartigen Phänomene sind das Leuchten des Augenhintergrundes vieler Tiere, besonders der Katzen und das Leuchten des Leuchtmooses (Schistostega osmundacea).

Im ersten Falle kommt das „Leuchten“ durch die starke Lichtreflexion an einer Schicht zustande, die Mikrokristalle oder stark lichtbrechende Fibrillen enthält und als Tapetum lucidum bezeichnet wird. Ein prinzipiell ähnlicher Mechanismus bewirkt ein „Leuchten“ bei einigen Rothalgen (Florideen) und Tangen aus den Gattungen Phylocladia, Polysiphonia, Wrangelia und Cystosira, bei denen die Reflexion der Lichter an mikroskopischen Platten bestimmter Gestalt erfolgt, die aus eiweißartigen Substanzen bestehen. Beim Leuchtmoos ist es der linsenförmige Bau der Zellen, der in bestimmten Richtungen ein starkes Licht nach außen wirft, in prinzipiell ähnlicher Weise, wie bei den Linsen der Leuchtorgane (s. u.). Ein ähnlicher Mechanismus bewirkt das Schimmern der Blätter von Hookeria splendens und ebenso den Goldglanz von Chromatophyton rosanoffii, einer Alge.

Die Angaben über das sogenannte „Blitzen aus den Blumen“ lassen die Natur dieses Phänomens nicht klar erkennen, doch ist soviel sicher, daß es sich dabei nicht um organismische Chemolumineszenz handelt. Ob diese Erscheinung analog dem St. Elmsfeuer also als eine Spitzenentladung aufzufassen ist, oder ob es sich um ein physiologisch-optisches Phänomen handelt, das mit der Art des Dämmerungssehens zusammenhängt, kann hier unentschieden bleiben.

2. Verbreitung. Von den Protisten angefangen ist die Fähigkeit Licht zu produzieren bei den verschiedensten Organisationstypen von Tieren und Pflanzen weit verbreitet, nur in den mehrzelligen grünen Pflanzen und den warmblütigen Tieren (Vögel, Säugetiere) haben wir größere Organismengruppen, die keine leuchtenden Formen enthalten. Unter den Protisten zeigen alle drei großen Gruppen, in die man dieses Reich teilen kann, die Protophyten, Protozoen und Bakterien in typischen Repräsentaten die Fähigkeit zu leuchten. Dabei ist ganz allgemein zu konstatieren, daß nur solche Formen leuchten, die in einem salzreichen Medium leben; den Süßwasserformen fehlt durchweg das Leuchtvermögen, im Meere dagegen ist es oft in der faszinierenden Pracht des Meerleuchtens zu beobachten, an dem unter den Protisten eine Alge (Peridinium divergens Ehrenberg) und ein Flagellat (Noctiluca miliaris) stark beteiligt sind, während eine Reihe von Bakterien ein eigentümliches „flächenhaftes“ Leuchten des Meeres bewirken, wobei geschöpftes Wasser in seiner ganzen Kontinuität ohne erkennbare Lichtpunkte zu leuchten scheint.

Bleiben wir bei dem Phänomen des Meerleuchtens, so können wir eine Reihe planktonischer Tiere aus verschiedenen Stämmen aufzählen, die es veranlassen, z. B. eine Reihe von Quallen (Oceania, Pelagia) von Ctenophoren (Beroë, Cydippe), die Feuerwalzen (Pyrosomen) aus dem Stamm der Tunicaten, kleine Krebse (Copepoden) usw.

Noch verbreiteter fast, als bei den Planktontieren ist das Leuchten festsitzender Formen und vor allem leuchten viele jener Spezies, gleichviel ob bentonisch oder planktonisch lebend, die in den Tiefen der Weltmeere dauernd jedem Sonnenlicht entzogen sind. Da haben wir leuchtende Schwämme, leuchtende Korallen (Alcyonarien) und Hydroidpolypen, leuchtende Seeigel (Diadema setosum), Seesterne (Brisinga), Schlangensterne (Amphiura, Ophiacanta, Ophiopsila), leuchtende Muscheln, wie die Bohrmuschel (Pholas), leuchtende Würmer (Chaetopterus, Nereis), und das Heer der leuchtenden Krebse (Euphausiden), Tintenschnecken und Fische der Tiefsee.

Fehlen dem Süßwasser Leuchtorganismen vollständig und erreichen sie im Meere ihre höchste Entwickelung, so sind die landbewohnenden Organismen mit relativ wenigen Formen an der Lichtproduktion beteiligt. In erster Linie sind eine Reihe von Fadenpilzen zu nennen, so besonders der Hallimasch (Agaricus melleus), und eine Anzahl von Arten aus den Gattungen Panus, Pleurotus, Collybia usw. Sie sind die Erreger des Leuchtens von faulendem Holz und Blättern.

Unter den Legionen der Insekten sind nur wenige Lichtproduzenten, so unter den primitiven Springschwänzen (Collembolen) die Neamura muscorum und unter den höheren Ordnungen das Johanniswürmchen (Lampyris splendidula) sowie sein naher Verwandter Luciola italica und die tropischen „Feuerfliegen“ (Pyrophorus). Der leuchtende Tausendfuß (Geophilus electricus) beschließt

die Reihe der leuchtenden Arthropoden auf dem Lande. Eine Reihe von Angaben über leuchtende Tiere, die sich in der Literatur finden, ist dadurch zustande gekommen, daß garnicht so selten Tiere durch leuchtende Pilze oder Bakterien infiziert werden. Die Beobachtungen über leuchtende Mücken erklären sich auf diese Weise, auch die über das Leuchten der Maulwurfsgrille und wohl auch der amerikanischen „Laternenträger" dürften so ihre Aufklärung finden.

Wenn wir oben die Warmblüter als nicht leuchtend nannten, so können wir diese Angabe noch etwas erweitern, und sagen daß in den beiden stammesgeschichtlichen Gruppen der Amphibien und Säugetiere einerseits, der Reptilien und Vögel (Sauropsiden) andererseits, leuchtende Spezies fehlen. Die höchst unsicheren Angaben über das Leuchten von Eidechseneiern, die einzigen, die aus diesen Klassen vorliegen, zeigen wie vollständig die Fähigkeit der Lichtproduktion geschwunden ist, die bei den Selachiern und Teleostiern eine so gewaltige Entwickelung zeigt.

3. Der Vorgang der Lumineszenz. Das Verständnis für den materiellen Vorgang beim Leuchten der Tiere und Pflanzen vermitteln die Untersuchungen über die Lichtproduktion bei chemischen Prozessen. Unter den organischen Verbindungen bei deren Umsetzungen Licht auftritt, ist eine Reihe solcher, die als Produkte von Organismen bekannt sind, oder doch bekannten Produkten der lebendigen Substanz nahestehen, z. B. Aldehyde, einwertige gesättigte primäre Alkohole, einbasische Fettsäuren, mehrwertige Phenole, ätherische Oele usw. Was die Art der Reaktionen anlangt, bei denen die Lumineszenz zu beobachten ist, so lehrt die Chemie, daß es vor allem solche sind, bei denen Sauerstoff oder Halogene mit den genannten Körpern reagieren. Für das Leuchten der Organismen scheint nur die erste Möglichkeit verwirklicht zu sein: das Organismenlicht ist streng an die Gegenwart von S a u e r s t o f f gebunden, es handelt sich stets um die O x y d a t i o n von Stoffen, die wir nach ihrer Fähigkeit eine leuchtende Reaktionen einzugehen, als „P h o t o g e n e" bezeichnen, ein Wort das nicht als Bezeichnung eines chemisch einheitlichen Körpers angesehen werden darf.

Die Leistung der Organismen beim Leuchten besteht zunächst in der Produktion der Photogene, die dem Verständnis keine anderen Schwierigkeiten bereitet, als jede Produktion von Sekreten.

Den Mechanismus des Leuchtens kann man sich dann entweder so vorstellen, daß die Photogene sich von selbst (durch Autoxydation) mit dem Sauerstoff so rasch verbinden, daß eine Lumineszenz zustande kommt, oder so, daß die Organismen noch besondere Stoffe produzieren, die den Ablauf der Leuchtreaktion beschleunigen. Wir würden solche Körper — da es sich um die katalytische Beschleunigung von Oxydationen handelt — als Oxydasen bezeichnen können, und müßten dann die organismische Lumineszenz als einen Fermentprozeß ansehen.

In diesem Sinne sprechen die Beobachtungen an der Bohrmuschel (P h o l a s d a c t y l u s), in deren leuchtendem Schleim zwei Körper enthalten sein sollen, das „Luciferin", welches das „Photogen" sein würde und die „Luciferase", die die Oxydase darstellen würde. Beide Körper leuchten einzeln nicht, wohl aber bei ihrer Vereinigung.

Die meisten Fermentreaktionen, vor allem die Oxydationen laufen in der lebendigen Substanz intrazellulär ab, und so finden wir auch den Leuchtprozeß vielfach innerhalb der Zellen vor sich gehen.

Intrazelluläres Leuchten kommt vor bei allen Leuchtbakterien und Leuchtpilzen, bei den leuchtenden Protisten sowie in den Leuchtorganen der Insekten, der Fische Tintenschnecken und vieler Krebse.

Eine Reihe von Erfahrungen lehrt aber, daß auch a u ß e r h a l b d e r Z e l l e n, i m S e k r e t die Leuchtreaktionen ablaufen können, ja daß es Leuchttiere gibt, bei denen das Sekret erst nach seiner Entleerung zu leuchten beginnt.

Das klassische Beispiel des „Sekretleuchtens" gibt die Bohrmuschel, von der man durch Reizung leicht erhebliche Mengen leuchtenden Schleimes erhalten kann, der unverändert weiter leuchtet, wenn er durch Porzellanfilter filtriert wird, woraus die völlige Unabhängigkeit dieses Vorganges von der Intaktheit der Struktur lebendiger Substanz hervorgeht. Sehr gut zu verfolgen ist das extrazelluläre oder Sekretleuchten bei einer Reihe kleiner mariner Planktonkrebse (Copepoden aus den Familien der Centropagiden und Oncaeiden) bei denen man direkt unter dem Mikroskop beobachten kann, wie eine Anzahl der zahlreichen Hautdrüsen einen Sekretpfropf ausstößt, der erst, sobald er den Sekretbehälter der Drüse verlassen hat und mit dem Seewasser in Berührung gekommen ist, zu leuchten beginnt.

Auch bei dem leuchtenden Tausendfuß (G e o p h i l u s e l e c t r i c u s) kann man sich leicht davon überzeugen, daß der Sitz des Leuchtens ein abwischbarer Schleim ist.

Diese Möglichkeit der Abtrennung des Leuchtprozesses von der Gesamtheit der übrigen Lebensvorgänge ist theoretisch höchst wichtig: die lebendige Substanz schafft den S t o f f der Leuchten kann und die Bedingungen für die Leuchtreaktion (anscheinend eine Oxydase), ihre S t r u k t u r aber ist keine generelle Bedingung für die

Durchführung der Leuchtreaktion, wohl aber eine spezielle Bedingung, die das Aufleuchten oder das Erlöschen des Lichtes regulieren kann. Das lehren deutlich die Erfahrungen über die beiden Typen der intrazellularen Leuchtens, die wir als das Leuchten im Grundumsatz und das Leuchten beim Leistungszuwachs des Umsatzes unterscheiden können.

Unter den chemischen Umsetzungen, die beständig in allen Organismen während des Lebens vor sich gehen, gibt es bei einer Reihe von Organismen auch solche, bei denen Lumineszenz auftritt. Entsprechend der Eigenschaft des Grundumsatzes (Ruhestoffwechsels), mit einer für die Spezies charakteristischen, und von den allgemeinen Ernährungsbedingungen abhängigen Intensität abzulaufen, liefern diese Leuchtreaktionen dauernd, solange der Organismus unter entsprechenden Bedingungen lebt, ihr Licht. Hierher gehört das Leuchten aller Bakterien und Pilze sowie der leuchtenden Peridineen und anscheinend das der Leuchtorgane einzelner Knochenfische (Anomalops und Photoblepharon), sowie der Knorpelfische (Haie).

Demgegenüber tritt das Leuchten bei einer Reihe anderer Organismen erst auf, wenn durch Reize die Intensität ihres Umsatzes gesteigert wird, d. h. mit Lichtproduktion sind hier Prozesse des Leistungszuwachses verbunden. Als Beispiele können wir die Noctiluca miliaris unter den Protozoen anführen (s. Fig. 1) und unter den vielzelligen Tieren die leuchtenden Käfer (Lampyris, Luciola), sowie die meisten der leuchtenden Tintenfische und Knochenfische. Während bei Noctiluca die Reize, welche die Lichtreaktionen auslösen, die Leuchtzelle direkt treffen, werden dieselben bei den Käfern, Tintenfischen und Fischen den Leuchtorganen auf dem Wege des Nervensystems zugeleitet.



Fig. 1. Ein Leuchtpunkt von Noctiluca miliaris bei 240facher Vergrößerung. Nach Quatrefages.

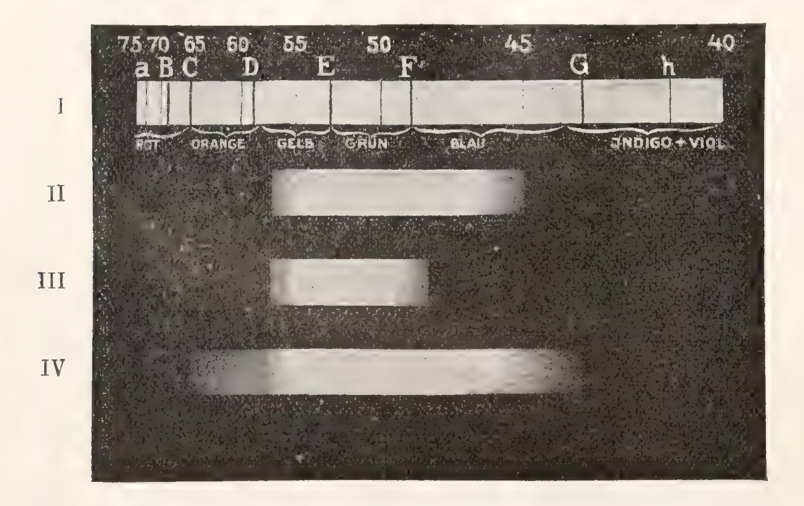


Fig. 2. Spektren von I. Sonnenlicht; II. Bacterium phosphoreum; III. Mycelium; IV. Pyrophorus noctilucus. I bis III nach Molisch, IV nach Langley und Very.

4. Die physikalischen Eigenschaften des Organismenlichtes. Zur Charakterisierung der physikalischen Eigenschaften des Organismenlichtes ist in einer Reihe von Fällen das Spektrum aufgenommen worden. Es ist kontinuierlich, aber nach der langwelligen, wie nach der kurzwelligen Seite enger begrenzt als das Sonnenspektrum, wie Figur 2 zeigt. Die Organismen emittieren also Licht, das bei genügender Intensität in den einzelnen Spektralteilen als Orange, Gelb, Grün, Blau und Violett gesehen werden könnte. In den meisten Fällen ist aber die Intensität der Gesamtstrahlung so gering, daß wir das Licht nur mit dem farbenunemp-

findlichen Dämmerungsapparat (Stäbchenapparat) des Auges sehen können, so daß wir nur Helligkeitsunterschiede und keine Farbenunterschiede auffassen. In dem Spektrum des Bacillus lucifer, der besonders stark leuchtet, konnte Molisch wirklich Farben (Grün, Blau, Violett) erkennen, dieses Spektrum, dessen Ausdehnung Figur 2 II entspricht, ist nach der kurzwelligen Seite wesentlich länger, als jenes der Pilze (III) und beide Spektra sind kürzer, als das von Pyrophorus noctilucus (IV).

Kennt man die Ausdehnung des Spektrums und die relative Intensität der einzelnen Strahlenarten, so kann man angeben, welche Farbe das unzerlegte Organismenlicht bei genügender Intensität haben müßte. Vielfach erscheint aber auch dieses Licht ungefärbt. Es ist bei den Angaben, die über die Farbe des Lumineszenzlichtes der Organismen in der Literatur vorliegen, nicht stets genügend darauf geachtet, daß die Beobachtung bei völlig dunkeladaptiertem Auge (d. h. nach mindestens 30 Minuten Aufenthalt im Dunkeln) gemacht werden muß. Abweichungen von einem rein weißen Farbenton findet man hauptsächlich in der Richtung auf gelb, gelbgrün, grün oder blau, doch erreichen die Farben nie eine bedeutende Sättigung, da stets die Erregung des Stäbchenapparates des Auges die Farbe weißlich macht. So leuchten z. B. die Männchen der Glühwürmchen gelbgrün, die Kolonien von Bacterium phosphoreum bläulichgrün oder geradezu smaragdgrün. In sehr ungesättigten Blau leuchtet Pennatula phosphorea und bläuliches Licht wird auch bei Copepoden (Metridia) beschrieben. Ultramarinblau ist das Licht von Pyrosoma giganteum.

Ganz isoliert steht die Angabe, daß das Licht einzelner Feuerwalzen (Pyrosoma atlanticum) bei Reizung rot sei, während das Licht des Grundumsatzes die üblichen Farben gelb, grün, blau zeigt. Rotes Lumineszenzlicht kommt auch außerhalb der Organismen selten vor, z. B. bei der Oxydation mehrwertiger Phenole.

Zu trennen von den Angaben über die Eigenfarbe des Lichtes, das der Lumineszenzvorgang liefert, sind diejenigen über die Farbe des Lichtes der Leuchtorgane, bei denen durch Reflektoren und Linsen (s. u.) ganz andere Farben entstehen können, wie sie die Leuchtreaktion primär liefert. Man darf also aus den Angaben, daß z. B. bei einem Tiefseecephalopoden (Thaumatolampas) die Augenleuchtorgane ultramarinblau, die fünf Ventralorgane himmelblau und die beiden Analorgane rubinrot leuchten, nicht etwa den Schluß ziehen, daß in ihnen drei ganz verschiedene Lumineszenzvorgänge stattfänden, für die die genannten Farben charakteristisch wären, vielmehr läßt das farblose oder schwach gefärbte Lumineszenzlicht durch Reflexion an verschiedenen Reflektoren die Farben entstehen. Besonders die rubinrote Farbe, die auch noch an konservierten Organen zu sehen ist, wird durch die Farbe der Linse bedingt, die wie eine farbige Scheibe dem Leuchtorgan vorgesetzt ist.

Die Messung der Intensität des Organismenlichtes liegt noch sehr im Argen. Mit dem Fettfleckphotometer bestimmt ergab eine Fläche von 1 qmm einer leuchtenden Kolonie von Vibrio Rumpel nur 0,000000000785 Hefnerkerzen, so daß eine Fläche von 2000 qm erst das Licht einer Hefnerkerze liefern würde. Zu vergleichenden Intensitätsbestimmungen ist vielleicht die photographische Methode geeignet, jedoch nur bei Formen, die ein gleiches Spektrum und gleiche Energieverteilung in demselben haben, da ja die Platten nur für bestimmte Wellenlängen empfindlich sind. Derartige Aufnahmen von Bakterienkulturen in ihrem Eigenlicht zeigt Figur 3. Schon bei einer Exposition von 1 Sekunde ist eine deutliche Schwärzung der Platte eingetreten.

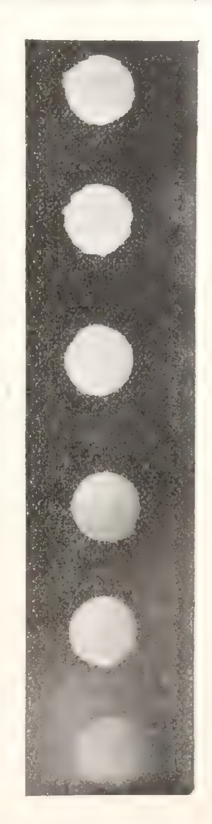


Fig. 3. Photographische Wirkung des Bakterienlichtes nach 60, 30, 10, 5, 3 und 1 Sekunde Belichtungszeit. Nach Molisch.

5. Die Bedingungen des Leuchtens. Die äußeren Bedingungen, deren Veränderung das Leuchten der Organismen beeinflußt, haben kaum etwas für diesen Prozeß charakteristisches; es sind im wesentlichen die allgemeinen Lebensbedingungen, die in optimaler Weise geboten auch das Leuchten optimal hervortreten lassen, während unter nicht optimalen Bedingungen die Lumineszenz schwächer zu werden pflegt. Man muß sich dabei stets gegenwärtig halten, daß der Vorgang der Lumineszenzreaktion unabhängig vom Leben der Zelle ist, daß diese vielmehr nur das Material für die Reaktion

schafft. Besonders günstige Bedingungen für die Leuchtreaktion geben salzreiche Nährmedien. So konnten Leuchtbakterien monatelang auf salzarmer Gelatine gezüchtet werden ohne eine Spur von Lumineszenz zu zeigen, während in dieser Zeit häufige Abimpfungen auf Salzagar prächtig leuchtende Kolonieen lieferten.

In naher Beziehung zur Lumineszenz steht, wie schon erwähnt, der freie Sauerstoff, an dessen Gegenwart die Leuchtreaktion streng gebunden ist, da sie ja eine Oxydation darstellt.

Einige Worte verlangt noch die Temperaturwirkung. Während außerhalb der Organismen mit steigender Temperatur entsprechend der gesteigerten Reaktionsgeschwindigkeit, die Lumineszenz dauernd zunimmt, hat sie bei den Lebewesen, wie jede Teilfunktion des Lebens, ein ausgesprochenes Optimum, das bei tieferen Temperaturen erreicht wird, als das Maximum der Atmung. Die Erklärung liegt wohl sicher darin, daß die Bildung der „Photogene“ bei höherer Temperatur herabgesetzt ist, während wir erwarten dürfen, daß gleiche Mengen Photogen bei höherer Temperatur stärker leuchten werden, als bei niederer, worüber aber Beobachtungen fehlen.

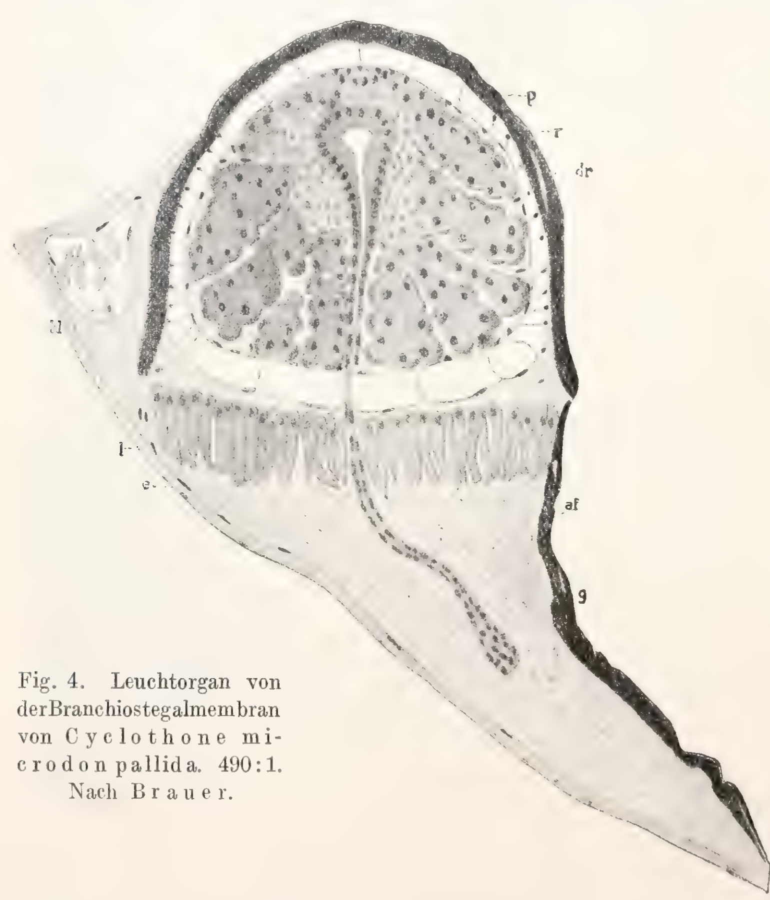


Fig. 4. Leuchtorgan von der Branchiostegalmembran von Cyclothone microdon pallida. 490:1. Nach Brauer.

6. Die Leuchtorgane. Während bei Pilzen und Protisten die Fähigkeit zu leuchten an keine besonderen Strukturen gebunden ist, finden wir bei allen vielzelligen Tieren nur bestimmte Zellarten, die Licht liefern. Niemals beteiligen sich, soviel wir wissen, Muskelzellen oder Nervenzellen an der Lumineszenz, diese tritt vielmehr ganz allgemein in den Zellen der Geschlechtsorgane und in Drüsenzellen auf. Diese letztere Zellart bildet auch im ganzen Tierreich die Grundlage für die Entwickelung eigener Leuchtorgane.

Es ist fraglich, ob es zweckmäßig ist, eine Drüse, welche ein leuchtendes Sekret liefert, als ein Leuchtorgan zu bezeichnen, eine Bezeichnung, die man für ein leuchtendes Ovarium sicher unpassend finden würde. Einfache Leuchtdrüsen kommen bei den oben aufgezählten Tieren mit Sekretleuchten vor (z. B. bei einer Anzahl Krebse, Würmern und Mollusken). Bei einer ganzen Anzahl systematischer Gruppen gewinnen die drüsigen Gebilde, die Licht liefern, durch die Vereinigung mit einer Reihe von Nebenapparaten den Charakter eigener Organe, wirklicher Leuchtorgane.

Die vergleichende Histologie läßt die Zellen des leuchtenden Anteils jedes Leuchtorgans als drüsenartige Elemente erkennen und besonders bei Knochenfischen und Krebsen ist an ganzen Reihen von Formen zu verfolgen, wie Leuchtdrüsen, bei denen das nach außen entleerte Sekret leuchtet, in die Leuchtkörper der Leuchtorgane umge-

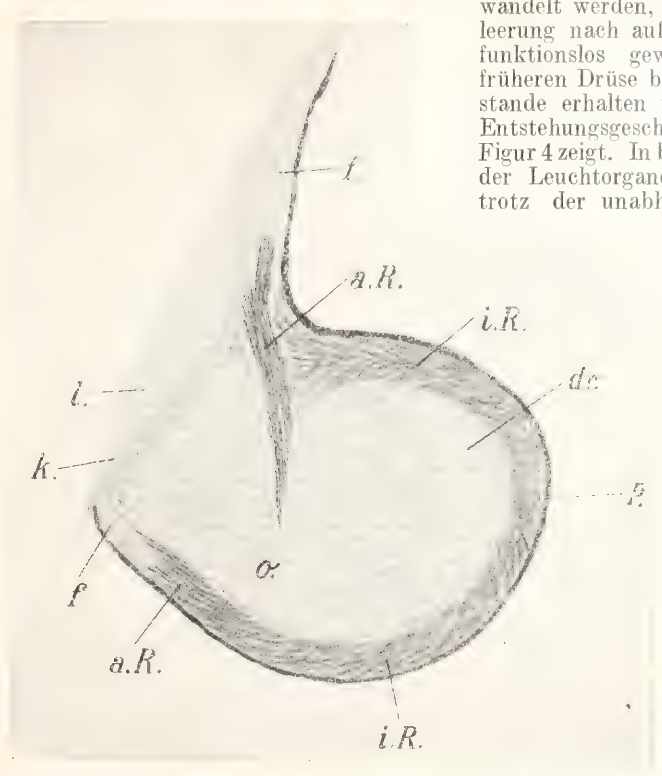


Fig. 5. Querschnitt durch ein Leuchtorgan von Maurolicus. dr Drüsenkörper; k Drüsenkappe; l Linse; f Bindegewebsfasern; a R äußerer; i R innerer Reflektor; p Pigment. Nach Mangold.

wandelt werden, bei denen keine Sekretentleerung nach außen mehr stattfindet. Der funktionslos gewordene Ausführgang der früheren Drüse bleibt oft in reduziertem Zustande erhalten und gibt Zeugnis von der Entstehungsgeschichte des Organs, wie z. B. Figur 4 zeigt. In bezug auf die Nebenapparate der Leuchtorgane herrscht bei ihnen allen trotz der unabhängigen (polyphyletischen) Entstehung bei den einzelnen Gruppen der Krebse, Tintenschnecken und Fische eine weitgehende Uebereinstimmung. Stets sind die Organe im größten Teil ihres Umfanges durch dunkles Pigment abgeblendet, stets liegt innerhalb dieses Pigmentbechers eine Gewebsschicht, die das Licht stark reflektiert. Der Bau dieser Reflektoren ist bei den einzelnen Gruppen recht verschieden, die Funktion der Reflexion des Lichtes überall dieselbe. Endlich besitzen die höher entwickelten Leuchtorgane ein System von (gefärbten oder ungefärbten) Linsen, die voraussichtlich die Rich-

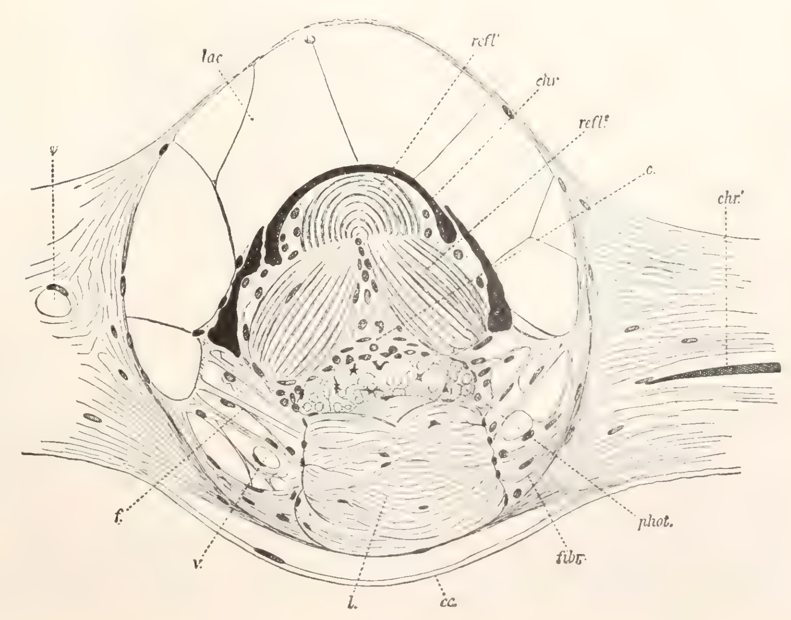


Fig. 6. Schnitt durch ein Leuchtorgan der Haut von Abraliopsis. phot Leuchtkörper; refl Reflektor; l Linse; co äußere Hautschicht (Cornea); lac lakunäre Räume. Nach Chun.

tung der Strahlen parallel oder sogar konvergent machen, wodurch bestimmte Stellen stärker beleuchtet werden. Die Figur 5 zeigt ein einfacher gebautes Organ eines Tiefseefisches, Figur 6 ein recht kompliziert gebautes von einem Tintenfisch der Tiefe.

Die Innervation der Leuchtorgane ist bei den Tintenfischen eine sehr reichliche, auch bei den Leuchtorganen der Insekten ist sie nachgewiesen. Bei den Teleostiern treten auffallend wenige feine Nerven an den Leuchtkörper und bei einigen scheint die Lichtproduktion überhaupt dem Einfluß des Nervensystems entzogen zu sein, eine Vermutung, die durch den anatomischen Befund nahe gelegt wird, insofern diese Leuchtorgane durch Muskeln derart gedreht werden können, daß ihr Licht nach außen abgeblendet ist, während diese Einrichtung jenen Formen fehlt, die durch nervöse Impulse das Leuchten unterdrücken (hemmen) können, oder bei denen überhaupt nur auf zentrale Impulse hin die Lumineszenz hervortritt.

7. Die Funktion der Lumineszenz. Die Frage nach der funktionellen Bedeutung des Lichtes, das die Organismen selbst produzieren, kann mit voller Berechtigung nur da gestellt werden, wo besondere Leuchtorgane vorhanden sind.

Nirgends scheint der Leuchtprozeß notwendig zum Leben zu sein, wie besonders die Erfahrungen an Leuchtbakterien lehren, die völlig normal leben und sich entwickeln können, ohne Licht zu produzieren.

Den leuchtenden Sekreten eine andere Funktion zuzusprechen, wie nicht leuchtenden Sekreten derselben Beschaffenheit, dazu liegt kein triftiger Grund vor.

Ebensowenig wie wir der Produktion von Elektrizität in allen Geweben lebender Organismen eine besondere Funktion zuweisen, ebensowenig ist dies für die augenfällige Erscheinung des Leuchtens berechtigt. Wie aber die — nebensächliche — Fähigkeit der Elektrizitätsproduktion die Entwickelung besonderer elektrischer Organe ermöglicht, so ist mit der an sich belanglosen Fähigkeit des Leuchtens das Material zur Bildung besonderer Organe gegeben.

Die nächstliegende Vermutung über die Funktion solcher Organe ist wohl die, daß sich die Tiere mit Hilfe ihres Eigenlichtes Gegenstände beleuchten, um sie sehen zu können, und einige Beobachtungen sprechen in der Tat in diesem Sinne. Damit ist aber für die erstaunliche Entwickelung von Leuchtorganen bei vielen Tiefsee-Tintenschnecken und -Fischen, die oft an 1000 derartige Organe besitzen, kein Verständnis gewonnen. Die Erörterungen über ihre mutmaßliche Funktion lassen sich am besten in der Weise zusammenfassen, daß man sagt: das in eigenen Organen produzierte Licht hat generell für die im Dunkeln lebenden Tiere dieselbe Bedeutung, wie die Farben für die Tiere der Lichtzonen. Es läßt sich dann die ganze Fülle von Erklärungsversuchen, die für die Bedeutung der Farben aufgeboten sind, auf die Lichter übertragen, und wir könnten an Erkennungslicht, Locklicht, Schrecklicht oder Schutzlicht (analog der Schutzfärbung) denken, ohne daß sich experimentelles Material für diese Vermutungen erbringen ließe.

Literatur. ***Heinrich Placidus***, *Die Phosphoreszenz der Körper oder die im Dunkeln bemerkbaren Lichtphänomene, Nürnberg 1818.* — ***Ehrenberg***, *Das Leuchten des Meeres, Abhandl. d. k. Akad. d. Wiss. zu Berlin 1836, S. 389 bis 571.* — ***E. Pflüger***, *Ueber die physiologische Verbrennung in den lebendigen Organismen, Arch. f. d. ges. Physiol. Bd. 10, 1075, S. 251 bis 367.* — ***Radziszewski***, *Ueber die Phosphoreszenz der organischen und organisierten Körper, Liebigs Annalen d. Chemie Bd. 203, 1880, S. 305.* — ***R. Dittrich***, *Ueber das Leuchten der Tiere, Wissenschaftl. Beil. z. Progr. d. Realgymnas. Am Zwinger zu Breslau 1888.* — ***H. Molisch***, *Leuchtende Pflanzen, Jena 1904.* — ***A. Pütter***, *Leuchtende Organismen, Z. f. allgem. Physiol. 1905, Bd. 5.* — ***M. Trautz***, *Studien über Chemielumineszenz, Z. f. physikal. Chemie 1905, Bd. 53.* — ***E. Mangold***, *Die Produktion von Licht, In Handbuch der vergleichenden Physiologie 1910, Bd. 3, S. 225 bis 392, hier ausführliches Literaturverzeichnis.*

A. Pütter.

Lichtreflexion.

1. Das Reflexionsgesetz. Trifft ein Lichtstrahl auf die Trennungsfläche zweier Medien, so wird er im allgemeinen in zwei Teile zerlegt. Der eine Teil dringt in das zweite Medium ein, während der erste in das erste Medium zurückgeworfen, „reflektiert" wird.

Wir haben hierbei zunächst zu unterscheiden, ob die trennende Fläche beider Medien rauh ist oder glatt. Glatt nennen wir die Oberfläche, wenn stets nahe beieinander aus derselben Richtung auf sie fallende Lichtstrahlen die Fläche unter dem gleichen Winkel treffen; rauh dagegen ist sie zu nennen, wenn die Oberfläche den parallelen Lichtstrahlen, auch wenn sie noch so dicht beieinander liegen, alle mögliche verschiedene Richtungen entgegenstellt. Nur bei glatten Oberflächen können wir einfache Gesetzmäßigkeiten über die Reflexion und Brechung aufstellen und näher verfolgen. Über die Reflexion bei vollkommen rauhen Flächen können wir nur aussagen, daß das reflektierte und das

hindurchgehende Licht nach allen Richtungen gleichmäßig verteilt sein muß. Derartiges Licht heißt diffus und wir sprechen von diffuser Reflexion. Rauhe Flächen in diesem Sinne bieten unter anderen mattgeschliffenes Glas, gewöhnliches weißes Papier. Dabei zeigt sich aber, daß keine Fläche wirklich vollkommen rauh ist. Z. B. eine matte Glastafel oder eine Fläche rauhen Zeichenpapiers wirft wohl sehr steil auffallendes Licht diffus nach allen Seiten auseinander; sowie man aber das Licht sehr flach auffallen läßt, so fangen diese Flächen schon an, ähnlich wie ein Spiegel zu wirken, d. h. sie werfen das Licht in einer Richtung wesentlich stärker zurück wie in den anderen. Bei solchen rauhen Flächen sprechen wir von dem Glanz der Fläche und verstehen darunter die Fähigkeit, flach einfallendes Licht mehr oder weniger gut zu spiegeln. Keine rauhe Fläche ist ganz ohne Glanz und es ist in manchen Fällen, z. B. in der Photometrie oftmals eine besondere Aufgabe, weiße Flächen herzustellen, die möglichst geringen Glanz haben, also möglichst vollkommen rauh sind.

Weiter haben wir zu unterscheiden zwischen Reflexion, die nur an der Oberfläche erfolgt und solcher, die erst erfolgt, nachdem das Licht schon bis zu gewisser Tiefe in das zweite Medium eingedrungen ist. Die nur von der Oberfläche erfolgende Reflexion muß stets Licht der gleichen Farbe ergeben, wie das einfallende Licht hat; also bei weißem einfallendem Licht auch selbst weiß sein. Nur Licht, das in die Tiefe des zweiten Mediums eingedrungen ist und dann zurückkehrt, kann hier durch Absorption verändert sein, so daß sich nicht mehr alle auffallenden Farben im reflektierten Licht finden. So ist denn auch das von der Oberfläche einer tiefblauen Glastafel reflektierte Licht rein weiß, wenn das einfallende Licht weiß war. Das Spiegelbild in einer blauen Glastafel zeigt durchaus die natürlichen Farben des gespiegelten Gegenstandes, nur muß man, um dies Spiegelbild zu sehen, die Rückseite der Glastafel schwärzen, denn sonst erhält man auch das Spiegelbild von dieser Rückseite, und dies Spiegelbild ist, da seine Strahlen durch das blaue Glas hin- und zurückgegangen sind, natürlich blau gefärbt. Alle Körper, die nur mit der Oberfläche reflektieren, müssen daher im weißen Licht weiß oder farblos grau aussehen; blaues, oder irgendwie sonst gefärbtes, Glas, das mattgeschliffen ist und dessen Rückseite geschwärzt, ist, sieht daher grau aus. Alle Körper, die in weißem Licht gefärbt erscheinen, lassen daher das Licht stets bis zu gewissem Grade in sich eindringen, üben auf das eindringende Licht Absorption aus und mengen das aus der Tiefe reflektierte Licht dem von der Oberfläche reflektierten bei (Näheres siehe im Artikel „F a r b e"). Tritt beim Eindringen in die Tiefe keine Absorption ein, so ist das gesamte zurückgeworfene Licht natürlich auch weiß. Ein Beispiel für diesen Fall bietet eine dichte Schneedecke. Das Licht dringt auch hier in die Tiefe ein, wird jedoch an den unendlich vielen Kristallnadeln nach allen Richtungen reflektiert und kehrt größtenteils als vollkommen diffuses Licht wieder zurück; daher die Undurchsichtigkeit des Schnees, obwohl doch jede einzelne Eisnadel durchsichtig ist.

Haben wir jedoch keine rauhe, sondern eine glatte Oberfläche, so gelten für den reflektierten Lichtstrahl folgende zwei Gesetze:

Errichten wir an der Stelle, wo der ankommende Lichtstrahl die Trennungsfläche erreicht, ein Lot zu dieser Fläche und nennen es das Einfallslot, so

1. liegt der reflektierte Strahl in der Ebene, die durch den ankommenden Strahl und das Einfallslot gelegt ist;

2. ist der Winkel zwischen einfallendem Strahl und Einfallslot der gleiche wie zwischen Einfallslot und reflektiertem Strahl.

Die genaueste experimentelle Bestätigung dieser beiden Gesetze wird erhalten, wenn mit einem um eine horizontale Achse drehbaren Fernrohr (Theodoliten) der Höhenwinkel eines Sternes einmal direkt gemessen wird und einmal, indem man auf das Spiegelbild des Sternes in einem Quecksilberspiegel einstellt.

Ist in der Figur 1 A die Drehungsachse des Fernrohrs, Q der Quecksilberspiegel und

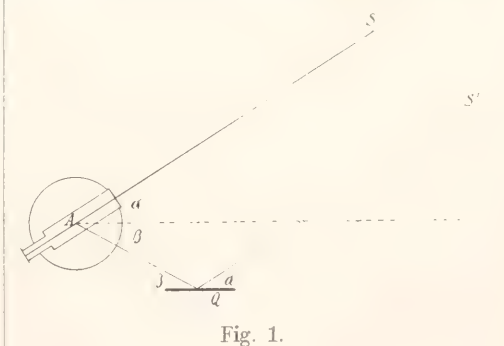


Fig. 1.

steht der Stern in der Richtung nach S und S′, so sind AS und QS′ wegen der unendlich großen Entfernung des Sterns parallel. Visiert man dann mit dem Fernrohr einmal direkt nach dem Stern, dann nach dem Horizont und dann nach dem Spiegelbild des Sterns, so findet man den Winkel α zwischen der ersten und zweiten Stellung stets genau gleich dem zwischen der zweiten und dritten Stellung, β, woraus aus leicht zu

übersehenden geometrischen Gründen der zweite Teil des Reflexionsgesetzes folgt. Der erste folgt daraus, daß beim Drehen des Fernrohrs um eine genau horizontale Achse das Spiegelbild des Sterns genau durch die Mitte des Gesichtsfeldes geht, wenn auch der Stern selbst in die Mitte des Gesichtsfeldes eingestellt war.

Die theoretische Begründung der Reflexionsgesetze erhalten wir durch die Vorstellung, daß das Licht auf eine Wellenbewegung zurückzuführen ist. Für die Ausbreitung jeder Wellenbewegung ist stets das Huygenssche Prinzip gültig, das sich folgendermaßen aussprechen läßt: Gehen von einem Zentrum nach allen Seiten Wellen aus, so bilden alle Punkte, die im gleichen Augenblicke von der Wellenbewegung erreicht werden, eine Wellenfläche. Die Schwingungsbewegung in einem Punkte, der in einem späteren Augenblick von der Wellenbewegung erreicht wird, läßt sich dann stets dadurch berechnen, daß man alle Punkte der Wellenfläche als selbständige Wellenzentren ansieht, und die von ihnen ausgehenden Einzelwellen in dem betrachteten Punkte summiert. Nach diesem Prinzip erscheint jede spätere Wellenfläche, W_2 in Fig. 2, als die Einhüllende der von der vorangehenden Wellenfläche W_1 ausgesandten Einzelwellen, wie die beistehende Fig. 2 deutlich macht. Kommen die Wellen aus unendlicher Entfernung, so werden die Wellenflächen zu Ebenen (siehe auch den Artikel „Lichtbeugung").

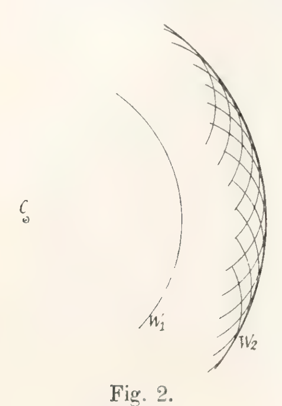


Fig. 2.

Wir können nach diesem Prinzip ganz allgemein jeden einmal von der Wellenbewegung erreichten Punkt als selbständiges Erschütterungszentrum ansehen, das seinen Anteil zu den Wellen in den anderen Gebieten beiträgt. Für die Richtung der reflektierten Wellen gewinnen wir hiernach folgende Ableitung. Es schreite die ebene Wellenfläche AB (Fig. 3) in der Richtung LA_7, die zu ihr senkrecht steht und der Richtung des einfallenden Lichtstrahls entspricht, gegen die Trennungsfläche AC zweier Medien vor, so wird sie diese nach gleichen Zeitelementen in den Punkten A_1, A_2, A_3 usw. der Reihe nach erreichen. In dem Maße wie diese Punkte erreicht werden, werden sie selbst zu Wellenzentren und senden, nun selbst Wellen aus. In dem Augenblick, wo die ursprüngliche Welle bis A_7 vorgeschritten ist, hat die von A ausgehende Welle einen Weg zurückgelegt, der gleich dem Abstande zwischen A_7 und AB sein muß, wegen der gleichen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen. Die von einem anderen Punkte etwa A_3 ausgehende Welle hat einen Weg von der Länge des Abstandes zwischen A_7 und A_3B_3 zurückgelegt. Aus der Figur erkennen wir sofort, daß die gesamten von den A ausgehenden Einzelwellen als gemeinsame Einhüllende die Ebene A_7B' haben. Dies ist also die Lage der reflektierten Welle im Augenblick A_7 und senkrecht zu ihr ist durch das Lot A_7L' die Richtung des reflektierten Strahles bestimmt. Aus den einfachen geometrischen Verhältnissen ergeben sich wieder ohne weiteres die beiden Grundgesetze der Reflexion.

Das Huygenssche Prinzip gestattet noch eine andere Ableitung des Reflexionsgesetzes. Wenn von irgendeinem Punkte A eine Wellenbewegung bis B gelangt ist und der Zustand in B aus den Einzelwellen, die von einer zwischen A und B liegenden Wellenfläche herstammen, berechnet wird, so zeigt sich, daß alle die Einzelwellen sich zonenweise so zusammenfassen lassen, daß sich benachbarte Zonen gegenseitig vernichten, so daß aus der Gesamtheit nur solche Zonen

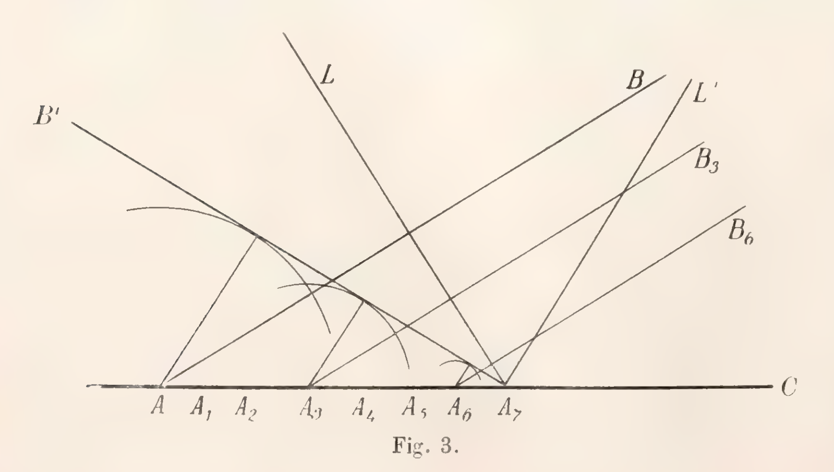


Fig. 3.

übrig bleiben, über die der Weg von A nach B einen extremen, längsten oder kürzesten, Wert hat. So folgt aus dem Huygensschen Prinzip der Fermatsche Satz „das Licht gelangt stets auf dem Wege von einem Punkte A zu einem anderen B, auf dem es die kürzeste (in besonderen Fällen auch die längste) Zeit braucht". Soll daher Licht von A nach B dadurch gelangen, daß es an der Fläche MN (Fig. 4) reflektiert wird, so muß es die Fläche an einer solchen Stelle C berühren, daß AC + CB ein Minimum wird.

Wir sehen dann, wenn A′ ebenso tief unter MN liegt wie A darüber, daß AC + CB = A′C + CB dann ein Minimum wird, wenn

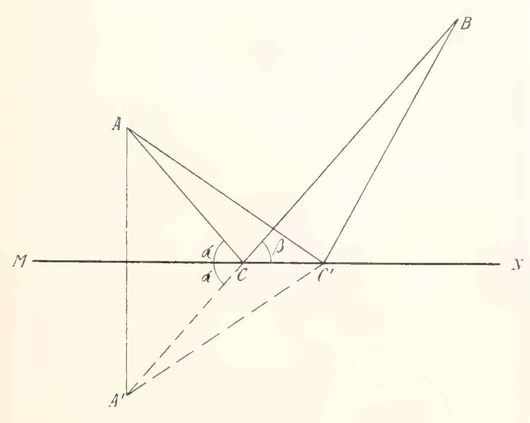


Fig. 4.

A′CB eine Gerade ist, dann sind aber wieder Einfallswinkel und Reflexionswinkel einander gleich (es wird $\alpha = \alpha' = \beta$). Ueber jeden anderen Punkt C′ hin wird A′C′ + C′B = AC′ + C′B größer als AC + CB.

Eine dritte Ableitung des Reflexionsgesetzes, die zu den Fresnelschen Reflexionsformeln für die Intensität des reflektierten Lichtes führt, ergibt sich aus den besonderen Vorstellungen über die Natur des Lichtes und ist in dem Artikel „Lichtpolarisation" besprochen.

2. Ebene Spiegel. Ist die Grenzfläche zweier Medien in größerer Ausdehnung eben, so haben wir einen ebenen Spiegel. Bei einer polierten Metallfläche, besonders aus Silber, ist die Intensität des reflektierten Lichtes besonders groß, so daß solche Flächen das reflektierte Licht am besten beobachten lassen. Eine Glasplatte, deren eine Fläche versilbert ist, ist die gebräuchlichste Form für Spiegel, da bei dieser die gegen atmosphärische Einflüsse empfindliche blanke Metallfläche geschützt ist. Fallen auf einen solchen ebenen Spiegel von einem leuchtenden Punkt ausgehende Lichtstrahlen in den verschiedensten Richtungen auf, so folgt aus der vorigen Figur 4 zum Fermatschen Satz, daß alle reflektierten Strahlen so gerichtet sind, als kämen sie von einem Punkte A, der ebenso tief unter der spiegelnden Fläche liegt wie der leuchtende Punkt darüber (siehe auch Fig. 5). Der Punkt A′ heißt das Bild von A und für ebene Spiegel gilt allgemein, daß stets das Bild eines Gegenstandes ebensoweit hinter dem Spiegel liegt, wie dieser davor. Durch einen ebenen Spiegel wird der vor ihm liegende Raum in gleichem Größenmaße aber nicht kongruent, sondern symmetrisch abgebildet, wie wir ohne weiteres übersehen, wenn wir uns im Spiegel erblicken; alles erscheint in natürlicher Größe aber rechts und links ist vertauscht.

Die von einem Spiegel reflektierten Strahlen können noch einen zweiten Spiegel treffen und abermals reflektiert werden; im zweiten Spiegel erscheint dann abermals ein Spiegelbild. Für die Lage dieses zweiten Spiegelbildes ist das Spiegelbild im ersten Spiegel der lichtsendende Gegenstand genau so, als wenn an seiner Stelle der Gegenstand selbst stünde. Daraus lassen sich die durch zwei in einem Winkel zueinander gestellten Spiegelbilder sehr einfach durch geometrische Konstruktion finden, wie in der Figur 6 angedeutet ist.

Aus dieser Figur geht hervor, daß von A ausgehende Strahlen, die zuerst den Spiegel 1 erreichen, dreimal reflektiert werden, als kämen sie von den Bildern A_1', A_1'', A_1''' her, und die die zuerst auf den Spiegel 2 fallen, werden so reflektiert als kämen sie von A_2' A_2'', A_2'''. Wir haben also in diesem Falle sechs Spiegelbilder, bei spitzerem Winkel

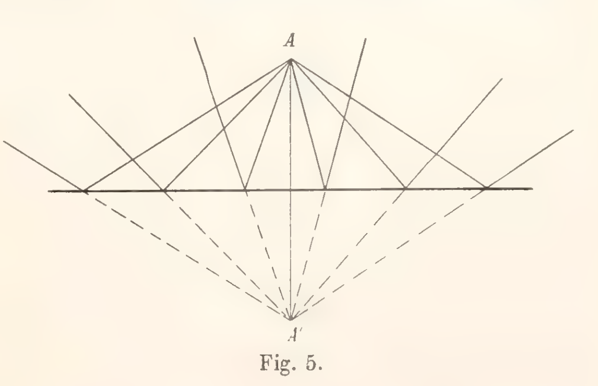


Fig. 5.

kann die Zahl auch größer werden. Bei geeigneter Lage von A zwischen den Spiegeln können die einzelnen dieser Bilder zusammen-

fallen. Bei einem Winkel von 90° zwischen den Spiegeln und symmetrischer Lage von A haben wir z. B. nur drei Spiegelbilder, bei 60° fünf, bei 45° sieben und entsprechend bei anderen Winkeln.

Eine Anwendung solcher mehrfachen Spiegelung finden wir im Kaleidoskop und in dem oftmals in Schaubuden vorge-

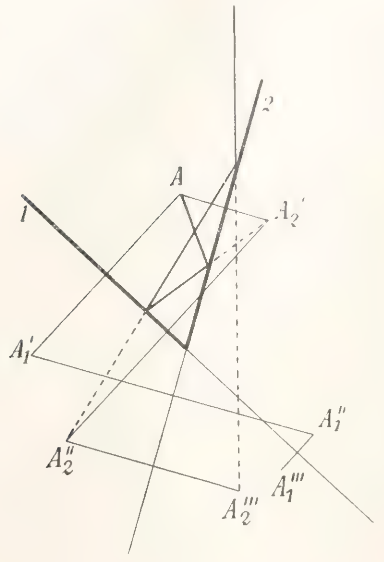


Fig. 6.

führten Irrgarten. Im ersteren sind zwei meist unter 60° gegeneinandergestellte Spiegel, in denen sich bunte Glasscherben so spiegeln, daß eine symmetrische, sechsteilige Figur sichtbar wird. Bei letzteren sieht man sein eigenes Spiegelbild in drei unter 60° gegeneinandergestellten Spiegeln unzählige Male wieder, so daß der Eindruck einer großen Volksmenge erweckt wird.

Wird ein Lichtstrahl an zwei Spiegeln, die unter dem Winkel β gegeneinander geneigt sind, reflektiert, so besteht für den Winkel γ zwischen dem einfallenden Lichtstrahl und dem zum zweitenmal reflektierten eine wichtige Beziehung.

Es ist in Figur 7 Winkel

$$\varepsilon = 180 - 2\alpha$$
$$\delta = 180 - \alpha - \beta$$
$$\zeta = 180 - 2\delta = 2\alpha + 2\beta - 180$$
$$\gamma = \varepsilon + \zeta = 2\beta$$

Das heißt also: der Winkel zwischen dem einfallenden und dem austretenden Strahl ist stets gleich dem Doppelten des Winkels zwischen den Spiegeln. Diese Beziehung gilt ganz allgemein und ist ganz unabhängig von der Richtung, in der der Strahl den ersten Spiegel trifft, wenn er nur so reflektiert wird, daß er den zweiten Spiegel noch erreicht. Auf diese Beziehung gründen sich mehrere sehr wichtige Anwendungen.

Gibt man dem Winkel β die Größe 45°, so stehen einfallender und austretender Strahl aufeinander senkrecht. Man erhält durch zwei unter 45° gegeneinander gestellte Spiegel ein Instrument, das in der Feldmeßkunst viel gebraucht wird und dazu dient, zwei zueinander senkrechte Richtungen abzustecken. Man hält hierbei den Winkel-

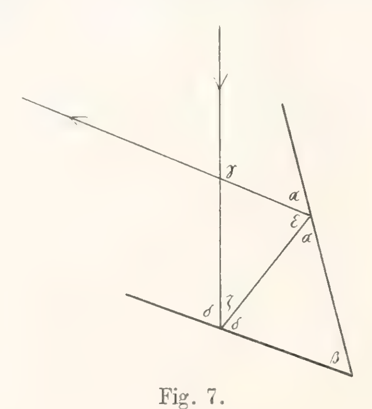


Fig. 7.

spiegel so, daß man über ihn hinwegsehend die eine Richtung im Auge hat; durch Hineinblicken in den Spiegel sieht man dann die hierzu in senkrechter Richtung gelegenen Gegenstände.

Die wichtigste Anwendung des obigen Satzes findet sich jedoch im Sextanten,

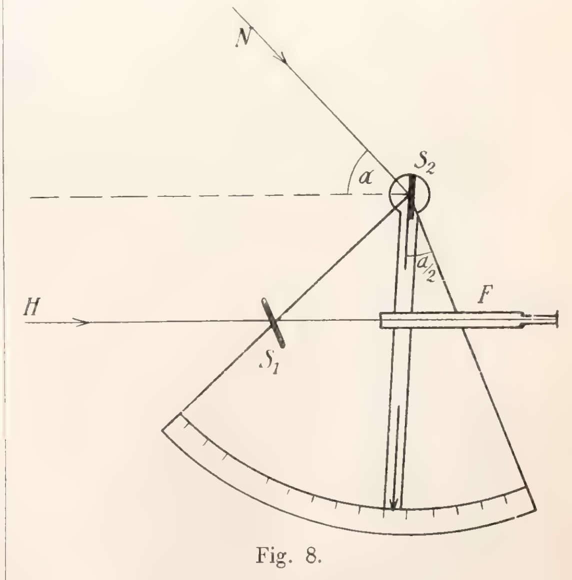


Fig. 8.

den die Seeleute zur Bestimmung von Sonnen- und Sternhöhen benutzen und der schematisch durch Figur 8 dargestellt ist. Mittels

des Fernrohrs F visiert man teils durch den Spiegel S_1, der in seiner oberen Hälfte nicht versilbert ist, hindurch nach dem Horizont H, teils sieht man durch doppelte Reflexion an den Spiegeln S_1 und S_2 in die Richtung N nach der Sonne oder einem Stern. Der Winkel α zwischen beiden Visierrichtungen ist dann gleich dem Doppelten des Winkels zwischen den Spiegeln. Da S_1 und das Fernrohr fest auf dem Instrument befestigt sind und S_2 mit einer Alhidade drehbar, so kann der Winkel zwischen den Spiegeln und damit auch der gesuchte Winkel direkt am Instrument abgelesen werden.

Eine weitere Anwendung desselben Satzes erhält man, wenn man zwei Spiegel unter 90° stellt, dann sind auffallender und reflektierter Strahl genau einander entgegengesetzt gerichtet. Hält man zwei solche Spiegel, die noch an geeigneten Stellen Durchblicköffnungen haben müssen, so vor ein Fernrohr, daß das am Spiegel 1 reflektierte Licht durch die Oeffnung im Spiegel 2 in die Achse des Fernrohrs gelangt, dann wird das am Spiegel 2 reflektierte Licht durch die Oeffnung im Spiegel 1 gerade nach dem Punkt hin reflektiert werden, auf den das Fernrohr hinsieht (vgl. Fig. 9). Durch

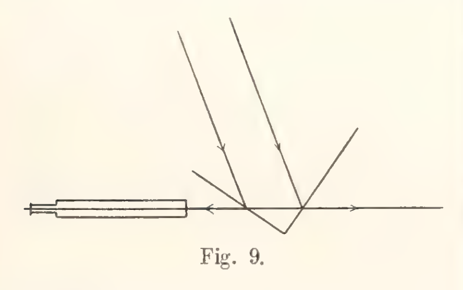


Fig. 9.

Abblenden und wieder Freilassen des Sonnenlichtes kann man dadurch Lichtsignale nach einem fernen im Fernrohr eingestellten Ort hinsenden, und dabei durch Nachdrehen des Winkelspiegels der fortschreitenden Sonne beständig folgen (Optische Signalgebung nach Gauß).

Weitere Gelegenheit mehrfache Spiegelungen zu beobachten, findet man bei jedem Glasspiegel, besonders wenn das Glas dick ist. Es findet stets sowohl an der Vorderseite wie an der versilberten Hinterseite eine Spiegelung statt, nur pflegt uns erstere meist zu entgehen, weil sie durch die viel hellere andere ganz überdeckt wird. Blicken wir jedoch ganz flach auf den Spiegel, so sehen wir näher vor ihn gehaltene Gegenstände doppelt, und wenn sie hell genug sind, sogar noch öfter, da auch noch wiederholte Spiegelungen im Innern des Glases auftreten. An dem Auftreten mehrfacher in entsprechenden Abständen liegender Spiegelbilder der Lampen in einem Juwelierladen kann man erkennen, ob in dem Laden hinter der eigentlichen Fensterscheibe noch eine zweite Spiegelscheibe zum besseren Schutz der ausgestellten Wertsachen angebracht ist.

An Anwendungen der einfachen Spiegelung des Lichtes sei hier noch genannt der Heliostat, ein Instrument, das die Aufgabe hat, das Sonnenlicht stets in eine

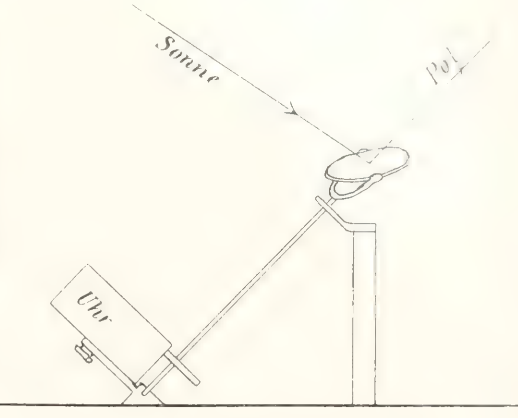


Fig. 10.

unveränderliche Richtung zu werfen. Am einfachsten läßt sich ein solcher Heliostat bauen, wenn die unveränderliche Richtung parallel zur Erdachse gewählt wird. Da die Sonne sich in einer Ebene senkrecht zu dieser Richtung bewegt, so braucht ein Spiegel nur so auf einer der Erdachse parallel gelagerten Achse angebracht zu werden, daß er erstmalig das Sonnenlicht in die Richtung dieser Achse wirft. Wird dann diese Achse mit dem Spiegel durch eine Uhr so gedreht, daß eine Umdrehung in 24 Stunden erfolgt, so folgt der Spiegel genau der Sonne, und daher wird das Sonnenlicht beständig in die Achsenrichtung geworfen. Durch einen zweiten Spiegel kann das Sonnenlicht dann leicht in jede gewünschte andere Richtung gebracht werden. Andere Heliostatenkonstruktionen z. B. von Foucault. Silbermann und Fueß haben es auch möglich gemacht, schon mit nur einem Spiegel das Sonnenlicht dauernd in jede beliebige Richtung zu werfen und dadurch den Lichtverlust bei der zweiten Reflexion zu vermeiden.

Es sei hier nur das Prinzip der Konstruktion von Fueß (Berlin) angegeben. Die Achse aa (Fig. 11) wird durch ein in C befindliches Uhrwerk in 24 Stunden einmal herumgedreht und ist in die Richtung der Weltachse einzustellen, was durch entsprechendes Einklemmen des Kreissegmentes S_1 in die das Ganze tragende Säule M leicht

zu bewirken ist. Im Mittelpunkt O des Segmentes S_1 trägt die Achse den Arm Ob, der durch einen Zeiger bis an die Kreisteilung auf S_1 verlängert ist. Stellt man den Arm Ob unter einem Winkel ε gegen a geneigt ein, so daß $90° - \varepsilon$ der Deklination der Sonne

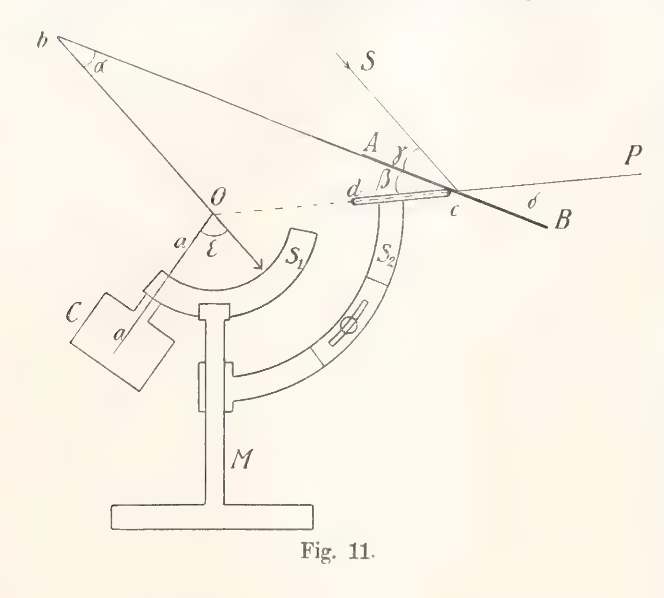


Fig. 11.

entspricht und dreht ihn dann in die Lage, daß er den Sonnenstrahlen parallel ist, so wird er nach Ingangsetzen des Uhrwerks stets nach der Sonne zeigen. An der Säule M sitzt ein zweites Kreissegment S_2, das verschieden weit ausziehbar ist, und dieses trägt den kleinen Arm dc, der stets nach O gerichtet ist und so lang ist, daß Ob = Oc ist. Wird nun ein Spiegel AB von b aus durch eine Stange gehalten, so daß er auf c ruht, und daß seine Normale in der Ebene des Dreiecks cOb liegt, so wird, wegen der Gleichheit der Winkel $\alpha = \beta = \gamma = \delta$, ein von S kommender Sonnenstrahl stets in die unveränderliche Richtung OdcP reflektiert. Durch verschieden weites Ausziehen von S_2 kann man die Richtung OP beliebig nach oben oder unten neigen und durch Drehen von S_2 um M nach allen Seiten hin verlegen. Da die obengenannte Winkelbeziehung stets bestehen bleibt, und Ob stets den Sonnenstrahlen parallel bleibt, wenn das Uhrwerk im Gange ist, so wird durch ein solches Instrument in der Tat das Sonnenlicht in jede beliebige feste Richtung dauernd gebracht werden können.

Noch eine weitere Anwendung der einfachen Reflexion ist von so großer praktischer Bedeutung, daß sie hier nicht übergangen werden kann, es ist dies die Poggendorfsche Spiegelablesung zur Bestimmung kleiner Winkeldrehungen. Ist von einer Drehachse, die wir uns vertikal denken wollen, ein Spiegel parallel zu dieser Achse befestigt, so können wir mit einem Fernrohr in dem Spiegel das Spiegelbild einer über dem Fernrohr angebrachten horizontalen Skala erblicken. Stehen Fernrohr und Skala genau senkrecht vor dem Spiegel, so sehen wir im Fernrohr die Mitte der Skala (Fig. 12); wird jetzt der Spiegel ein wenig gedreht, so sehen wir einen seitlich gelegenen Teil der Skala im Gesichtsfeld. Nach dem Reflexionsgesetz beschreibt bei der Drehung die Sehlinie einen doppelt so großen Winkel, wie die Spiegelnormale, wie aus Figur 12 ohne weiteres zu ersehen ist. Eine Umänderung dieser von Poggendorf angegebenen Methode zur Messung sehr kleiner Winkeldrehungen erhält man dadurch, daß man das Fernrohr ersetzt durch eine Lampe, kleine Glühlampe, mit davor gestellter Linse, so daß auf der Skala ein Bild des Lampenfadens entsteht. Dann sieht man bei einer Drehung des Spiegels das Bild auf der Skala wandern. Die Empfindlichkeit dieser Winkelmessung hängt wesentlich ab von dem Abstand zwischen Spiegel und Skala, doch kann sie durch Vergrößerung dieses Abstandes nicht beliebig weit gesteigert werden, da mit dem Größerwerden des Abstandes auch die Skalen-

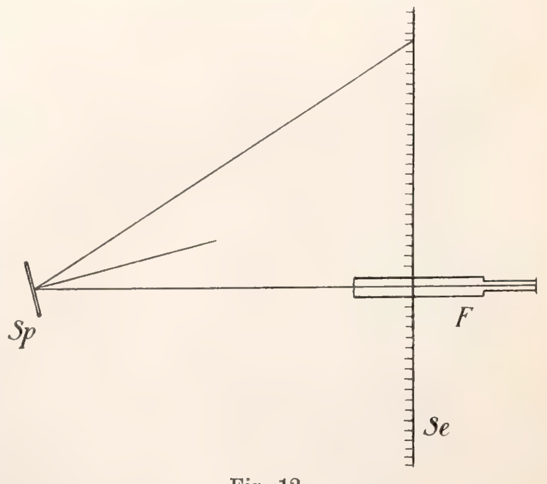


Fig. 12.

teile im Fernrohr kleiner werden und ebenso das Bild der Glühlampe größer wird, so daß, was man an Empfindlichkeit der Methode

scheinbar gewinnt, zum Teil wieder durch ungenauere Ablesbarkeit verloren geht. Versuche, die Empfindlichkeit durch mehrfache Spiegelung zu steigern, wurden neuerdings von W. Volkmann und Geiger gemacht. Da bei jeder Reflexion einer Drehung des einfallenden Strahls die doppelte Drehung des reflektierten entspricht, so kann man beim Messen sehr kleiner Drehungen durch mehrfache Reflexion des Lichtzeigers an feststehenden Spiegeln die ursprüngliche Drehung auf das Mehrfache vergrößern, ohne die gesamte Länge des Lichtzeigers wesentlich zu vergrößern. Inwieweit auf diesem Wege eine praktisch wertvolle Steigerung der Empfindlichkeit in der Spiegelablesung erreichbar ist, hängt wesentlich von der Güte der verwendeten Spiegel ab, da jeder Fehler in den spiegelnden Flächen bei dieser Ablesungsweise mit vergrößert wird und die Genauigkeit wieder herabsetzt.

Als eine besondere Form der Poggendorfschen Spiegelablesung kann man die Methode der Autokollimation ansehen. Bei dieser ist die Skala in das Okulargesichtsfeld des Fernrohrs hineingelegt und hier als feine Skala sichtbar, bei S in Figur 13.

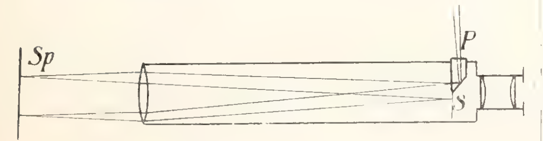


Fig. 13.

Die Hälfte des Gesichtsfeldes ist durch das kleine Beleuchtungsprisma p bedeckt, durch dieses fällt Licht nahezu in die Achse des Fernrohrs, gelangt durch das Objektiv auf den Spiegel Sp und wird durch das Objektiv zurück auf die Skala geworfen. Da zugleich auf der Grundfläche des Prismas eine kleine Indexmarke angebracht ist, so erscheint ein Bild dieser Marke auf der Skala. Sobald der Spiegel sich dreht, wandert die Marke vor der Skala.

Die älteste Anwendung einer derartigen Ablesung finden wir in der Anwendung des Gaußschen Okulars. Bei diesem ist zwischen Fadenkreuz F (Fig. 14) und Okular O eines

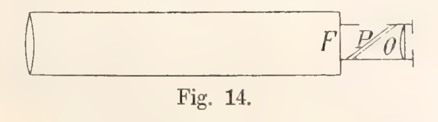


Fig. 14.

Fernrohrs eine schräg gestellte Glasplatte P angebracht. Diese hindert nicht das Hindurchsehen, gestattet aber durch ein seitliches Fenster Licht in die Fernrohrachse zu reflektieren. Wird dieses Licht durch eine dem Fernrohr gegenüberstehende ebene Fläche in das Fernrohr zurückgeworfen, so erscheint das Gesichtsfeld im Okular hell beleuchtet und in diesem hellen Gesichtsfeld erscheint das Bild des Fadenkreuzes noch einmal als Schattenbild. Deckt sich dies Schattenbild mit dem Fadenkreuz selbst, so steht die spiegelnde Fläche genau senkrecht zur Fernrohrachse.

Diese Methode der Senkrechtstellung einer Fläche zu einem Fernrohr findet besonders Verwendung beim Messen von Prismen- und Kristallwinkeln zum Zwecke der Bestimmung des Brechungsindex (vgl. den Artikel „Lichtbrechung").

3. Sphärische Spiegel. Ist die spiegelnde Fläche in Form einer Kugelschale gekrümmt, so entsteht ein sphärischer Spiegel, und zwar ein Hohlspiegel oder Konkavspiegel, wenn die spiegelnde Seite nach dem Kugelinnern zu liegt, dagegen ein Konvexspiegel, wenn sie nach außen hin liegt. Die einfachsten Verhältnisse für den Strahlengang bei solchen Spiegeln haben wir, wenn die einfallenden Strahlen nahe beim Kugelmittelpunkt vorbeigehen. Solche Strahlen heißen Zentralstrahlen.

Bei einem Hohlspiegel möge C der Kugelmittelpunkt sein (Fig. 15), A ein lichtaussendender Punkt; AC treffe die Mitte M des Spiegels, dann heißt AM die Achse. Ein Strahl AP wird dann nach PB reflektiert, wenn Winkel APC = CBP ist. Da CP die Halbierungslinie des Winkels bei P ist, so gilt dann die Proportion $\frac{AP}{BP} = \frac{AC}{CP}$.

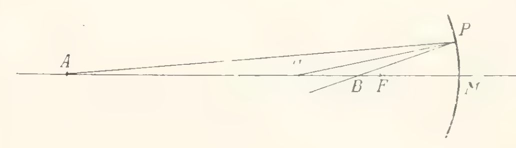


Fig. 15.

Geht nun der Strahl AP sehr nahe an C vorbei, so daß die Winkel bei P sehr spitz sind, so können wir jedenfalls angenähert setzen $\frac{AP}{BP} = \frac{AM}{BM}$. Bezeichnen wir nun den Abstand von A bis M, Objektabstand, mit a, den Abstand von M bis B, Bildabstand, mit b, also BM mit —b, und den Abstand von C bis M mit r, so wird

$\frac{a}{-b} = \frac{a-r}{r+b}$ oder $ar + ab = -ab + br$; $2ab = br - ar$ folglich $\frac{2}{r} = \frac{1}{a} - \frac{1}{b}$.

Aus dieser Gleichung ersehen wir, daß dann, wenn das Objekt A sehr weit entfernt ist, unendlich weit, $a = \infty$, $b = -\frac{r}{2}$ wird,

b sollte gemessen werden von M nach B hin: wenn der Wert von b negativ ist, heißt das also, daß B links von M liegt. Ein unendlich fernes Objekt wird also in der Mitte zwischen M und C abgebildet in F. Dieser Punkt heißt auch der Brennpunkt des Hohlspiegels, die Strecke $MF = \frac{r}{2}$ die Brennweite. Rückt A näher heran, so rückt das Bild B von F fort nach C hin. Hat A den Punkt C erreicht, so hat auch B den Punkt C erreicht; Objekt und Bild fallen also hier zusammen. Rückt A von C bis F vor, so verschiebt sich B über C hinaus bis ins Unendliche. Rückt A noch näher an den Spiegel heran, so verlassen die reflektierten Strahlen den Hohlspiegel divergent, als kämen sie von einem Punkte her, der rechts von M liegt, virtuelles Bild. Je näher A an M heranrückt, desto näher rückt auch das virtuelle Bild an M heran.

In sehr einfacher Weise kann man sich schnell eine Uebersicht über die Lage vom Objekt und Bild verschaffen, wenn man die zeichnerische Konstruktion zu Hilfe nimmt.

Ist die Fläche des Hohlspiegels und sein Brennpunkt in der Zeichnung gegeben (Fig. 16), so findet man den Bildpunkt zu einem

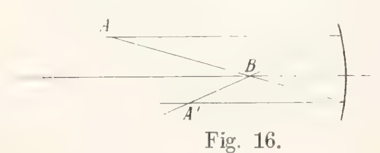


Fig. 16.

beliebigen Objektpunkt A auf folgende Weise: Stets läßt sich durch A ein Strahl legen, der durch den Brennpunkt B geht; dieser muß parallel der Achse reflektiert werden. Ein zweiter Strahl läßt sich durch A parallel zur Achse ziehen, und dieser muß nach der Reflexion durch B gehen. Wo sich die beiden Strahlen nach der Reflexion schneiden, liegt der Bildpunkt von A. Führt man diese Konstruktion für beliebig viele Objektpunkte durch, so findet man die oben aus den Formeln geschlossenen Beziehungen über die Lage von Objekt und Bild bestätigt.

In diesem ganzen Verhalten ordnen sich die Erscheinungen am Hohlspiegel vollständig den allgemeinen Abbildungsgesetzen, die in dem Artikel „Abbildungslehre" behandelt sind, unter. Daselbst ist auch der allgemeine Beweis zu finden, daß die Bilder, solange sie reell sind, umgekehrt stehen und daß nur die virtuellen Bilder aufrecht stehen. Auch über die geometrischen Konstruktionen, durch die zu irgendeinem Objekte das Bild zu finden ist, und die Größenverhältnisse der Bilder ist dort berichtet. Beim Hohlspiegel sind hiernach in weitaus den meisten Fällen die Bilder reell, das heißt aber, sie können auf einer Mattscheibe oder weißen Fläche aufgefangen und objektiv sichtbar gemacht werden. Darauf beruht die praktische Bedeutung des Hohlspiegels. Bei der am Schlusse des vorigen Abschnittes beschriebenen Spiegelablesung an einer Skala kann bei Verwendung einer Glühlampe die Linse entbehrt werden, wenn an Stelle des ebenen Spiegels an der Drehachse ein Hohlspiegel befestigt ist. Sind dann Glühlampe und Skala in gleichem Abstand vom Spiegel, so muß der Krümmungsradius gleich diesem Abstand sein. Rücken wir die Lampe näher heran, so muß die Skala weiter entfernt werden. Auch in anderen Fällen kann der Hohlspiegel als Ersatz für Linsen dienen, z. B. beim Fernrohr (vgl. hierzu den Artikel „Optische Instrumente").

Bei der Ableitung der metrischen Beziehungen vom Hohlspiegel wurde eine Vereinfachung gemacht durch die Voraussetzung, daß der Strahl AP sehr nahe an C vorbeigehen sollte; läßt man diese Voraussetzung fallen und betrachtet weit geöffnete Strahlenbüschel, so kann eine scharfe Strahlenvereinigung nicht mehr eintreten. In Figur 17

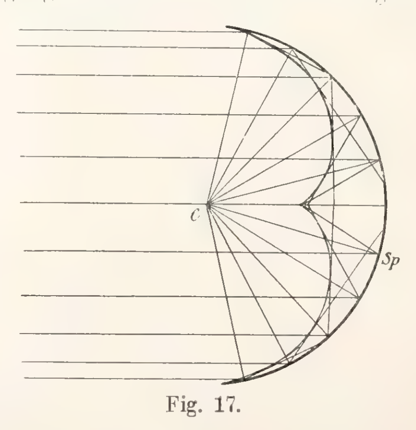


Fig. 17.

ist durch geometrische Konstruktion der Verlauf der reflektierten Strahlen eingezeichnet, wenn ein breites, paralleles, also aus dem Unendlichen kommendes, Strahlbüschel auf einen Hohlspiegel fällt. Wir sehen, nur die mittleren Strahlen vereinigen sich im Brennpunkt, die seitlichen schneiden die Achse näher am Spiegelscheitel. Diese Abweichung heißt die sphärische Aberration (vgl. auch die Artikel „Abbildungslehre" und „Linsensysteme"). Die Einhüllende der reflektierten Strahlen ist eine Kurve, die man die Kaustik, bei Spiegeln Katakaustik, bei Linsen Diakaustik, nennt. Man kann diese Kaustik leicht sichtbar machen, wenn man einen blanken zylindrischen Körper, goldenen Fingerring, in die Sonne legt; dann zeichnet sich die Kaustik als helle Brennlinie deutlich ab.

Umgekehrt verhindert auch das Vorhandensein der sphärischen Aberration, daß man die von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahlen alle genau parallel in den Raum hinauswerfen kann, wie es bei Scheinwerfern verlangt wird. Deswegen dürfen

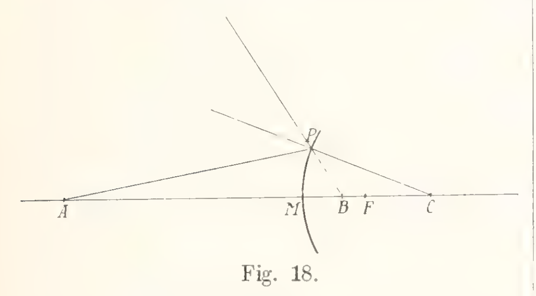


Fig. 18.

auch die bei Scheinwerfern verwendeten Spiegel nicht als Kugelflächen gebogen oder geschliffen sein, sondern müssen einer anderen Fläche folgen. Die hierfür erforderliche Fläche ist die Parabel.

Ganz ähnliche Verhältnisse wie beim Hohlspiegel haben wir beim Konvexspiegel. Wenden wir dieselben Bezeichnungen an, so ist nach Figur 18 PC jetzt die Halbierungslinie des Außenwinkels von dem Dreieck APB. Daher ist jetzt $\frac{AP}{PB} = \frac{AC}{BC}$. Setzen wir wieder $\frac{AP}{PB}$ als sehr nahe gleich $\frac{AM}{MB}$ und bezeichnen AM mit A, MB mit b, CM mit r, also MC = — r so wird $\frac{AC}{BC} = \frac{a-r}{r-b} = \frac{a}{b}$ oder $ab - rb = -ar - ab$; $2ab = br - ar$ also wieder $\frac{2}{r} = \frac{1}{a} - \frac{1}{b}$. Damit ist wieder die Uebereinstimmung mit den allgemeinen Abbildungsgesetzen erreicht. Auch der Konvexspiegel hat einen Brennpunkt, der in der Mitte zwischen dem Scheitel und dem Krümmungsmittelpunkt liegt; die Brennweite ist wieder $\frac{r}{2}$. Die Bilder von reellen Objekten sind jetzt stets nur virtuell und aufrechtstehend. Auch in diesem Falle kann man durch die gleiche zeichnerische Konstruktion wie beim Hohlspiegel alle diese Beziehungen bestätigen. Man kann die Bilder im Konvexspiegel also immer nur subjektiv sehen. Unendlich ferne Objekte werden sehr klein, aber in endlicher Entfernung hinter dem Konvexspiegel abgebildet. Der ganze unendliche Raum erscheint also in diesem Spiegel in der Tiefenerstreckung auf eine recht kleine Strecke zusammengedrängt. Nähert man sich einem solchen Konvexspiegel mehr und mehr, so kommt einem das Spiegelbild immer mehr entgegen und wächst beständig, bis es beim Berühren der Spiegel die natürliche Größe erreicht. Diese Erscheinungen lassen sich leicht in den großen Glaskugeln beobachten, die man oft in Gärten aufgestellt findet, aber auch in jedem annähernd kugelig geformten blanken Geschirr.

4. Totalreflexion. Bei allen bisher aufgeführten Erscheinungen über Lichtreflexion war keine Rücksicht genommen auf die Intensität des reflektierten Lichtes im Vergleich zum einfallenden: es war nur gesagt, daß das Licht im allgemeinen beim Auftreffen auf eine Grenzfläche in zwei Teile, den reflektierten und den eindringenden Teil, zerlegt wird, so daß der reflektierte jedenfalls von geringerer Intensität sein muß als der einfallende. Die genaueren Intensitätsverhältnisse zwischen diesen Strahlen finden ihre Behandlung in dem Artikel „Lichtpolarisation". Es gibt aber einen Fall, der hier besonders besprochen werden muß, das ist der Fall, in dem ein gebrochener Strahl überhaupt nicht zustande kommen kann, so daß die ganze Lichtintensität sich im reflektierten Strahl wiederfindet. In diesem Falle spricht man von Totalreflexion.

Zwischen dem einfallenden und dem gebrochenen Strahl findet die Beziehung statt, daß der Sinus des Einfallswinkels zum Sinus der Brechungswinkel im Verhältnis des Brechungsindex steht (vgl. den Artikel „Lichtbrechung"). Von diesen beiden Winkeln ist daher jener im optisch dünneren Medium stets der größere, der größte Wert, den dieser aber haben kann, ist 90°. Zu diesem Werte von 90° berechnet sich nach dem Werte des Brechungsindex ein ganz bestimmter zugehöriger Winkel β und wenn der Einfallswinkel im optisch dünneren Medium gerade 90° ist, so gibt der berechnete Winkel β die Richtung des gebrochenen Strahls

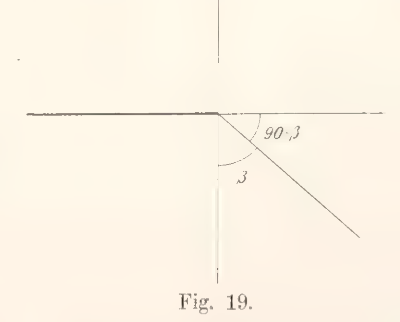


Fig. 19.

für diesen streifenden Eintritt. Offenbar kann dann in den Winkelraum 90—β (s. Fig. 19) kein Licht von der Seite des dünneren

Mediums her eindringen; zu Strahlen, die in diesem Winkelraum liegen, kann es keine zugehörigen Strahlen auf der Seite des optisch dünneren Mediums geben. Lassen wir daher das Licht von der Seite des optisch dichteren Mediums herkommen, in der Figur 19 also von unten her, so daß wir ihm Einfallswinkel geben, die größer als β sind, so kann von diesen Strahlen überhaupt kein Anteil in das andere Medium übertreten, sie müssen ganz reflektiert werden.

Die Totalreflexion werden wir also überall da beobachten, wo Licht aus dem optisch dichteren Medium in das dünnere übertritt und hinreichend große Einfallswinkel auftreten. Blicken wir von unten gegen die Wasseroberfläche eines Aquariums, so werden wir z. B. bemerken, daß wir nur dann durch diese Oberfläche hindurchsehen können, wenn wir sehr tief von unten hinaufblicken; sowie wir etwas flacher hinblicken, erscheint die Wasseroberfläche wie ein undurchsichtiger glänzender Spiegel. Daß die Lichtintensität bei Totalreflexion wirklich heller ist als bei Reflexion am besten Metallspiegel, sehen wir leicht, wenn wir in ein Reagenzglas Quecksilber tun und dies dann in ein Becherglas mit Wasser eintauchen. Beleuchten wir das Becherglas von der Seite und blicken von oben auf das etwas geneigt gehaltene Reagenzglas, so bekommen wir Licht ins Auge, das am Reagenzglas reflektiert ist. Dann zeigt sich, daß der mit Quecksilber gefüllte Teil dunkler erscheint als der nur mit Luft gefüllte obere Teil. Die metallische Reflexion am Quecksilber gibt also weniger Licht als die Totalreflexion an der Grenzfläche Glas-Luft.

Nicht nur gegen Luft, sondern gegen jedes optisch dünnere Medium ist die Totalreflexion zu beobachten. Wenn in einem Becherglas Benzol auf Wasser geschichtet ist, so erscheint die Trennungsfläche schräg von oben gesehen in Silberglanz und undurchsichtig, schräg von unten gesehen ist sie jedoch durchsichtig und viel weniger hell. Umgekehrt ist es bei Wasser, das auf Schwefelkohlenstoff geschichtet ist.

Die genaue Erklärung des Vorganges der Totalreflexion macht dadurch gewisse Schwierigkeiten, daß es unverständlich sein würde, wenn das optisch dünnere Medium auf den Lichtstrahl einen Einfluß haben sollte, ohne daß die Lichtenergie überhaupt in dieses Medium eingetreten ist. In der Tat zeigt denn auch die genauere Diskussion der Formeln (vgl. den Artikel „Lichtpolarisation"), daß doch ein Teil der Lichtenergie in das dünnere Medium an der Grenzfläche übertritt, aber dann wieder in das andere Medium zurückgewendet wird. Nach W. Voigt kann man diesen Lichtübertritt sichtbar machen, wenn man zwei Flächen, an denen beiden Totalreflexion eintritt, unter sehr stumpfem Winkel zusammenstoßen läßt. Diese Kante erblickt man dann als helle Lichtlinie vom optisch dünneren Medium aus, ein Beweis, daß an dieser Kante eine gewisse Lichtmenge in dieses Medium trotz der Totalreflexion eindringt und sich weiter ausbreitet.

Infolge der großen Lichtstärke des reflektierten Lichtes bei der Totalreflexion wird diese häufig mit Vorteil an Stelle metallischer Spiegel überall dann angewandt, wenn es gilt einem Lichtstrahl eine andere Richtung zu geben. Die einfachste Form, in der dies geschieht, ist die des rechtwinkeligen Prismas.

Schon bei gewöhnlichem Krownglas mit dem Brechungsindex 1,5 wird ein senkrecht zu einer Kathetenfläche einfallender Lichtstrahl an der Hypotenuse total reflektiert, so daß er senkrecht durch die andere Kathetenfläche austritt. Alle Strahlen, die schräg auf die Kathete fallen, aber innerhalb des Winkels NMB (Fig. 20), werden an der

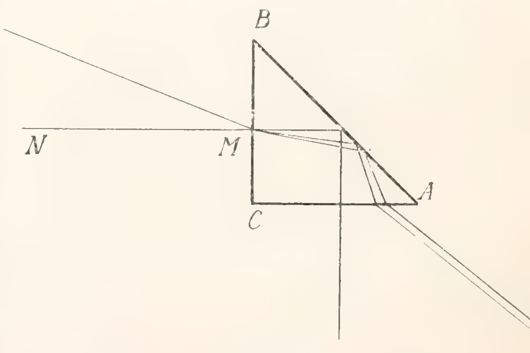


Fig. 20.

Kathete zwar gebrochen und deswegen spektral zerlegt. Alle Teile werden aber an der Hypotenuse total reflektiert und erhalten an der anderen Kathete eine solche Brechung, daß sie wieder genau parallel werden. Das austretende Lichtbündel erscheint als weißer Strahl und alle Spiegelbilder, die durch derartige Spiegelung gesehen werden, sind völlig frei von farbigen Säumen. In dem ganzen Bereich des bezeichneten Winkelraums und auch noch etwas darüber hinaus in den Winkelraum NMC hinein ersetzt das Prisma vollkommen einen einfachen ebenen Spiegel, der an der Stelle der Hypotenusenfläche angebracht ist. Im Wesen der Totalreflexion liegt es, daß eine Versilberung der Rückfläche die Helligkeit des reflektierten Lichtes nicht zu steigern, sondern nur zu schwächen vermag.

Eine besondere Anwendung eines solchen Prismas erhalten wir durch den in Figur 21

gezeichneten Strahlengang. Stellt man ein solches Prisma mit horizontaler Hypotenuse und hinreichender Ausdehnung vor den Kopf eines Projektionsapparates, so zeigt sich, daß die austretenden Strahlen ihre Lage beim Durchgang durch das Prisma gegen einander vertauschen, so daß die anfangs oben liegenden zu unterst kommen und umgekehrt. Während der einfache Projektionsapparat die abzubildenden Gegenstände bekanntlich in umgekehrter Lage abbildet, erhält man durch Zwischenschalten des Prismas aufrechte Bilder.

Blickt man von der Hypotenusenseite in ein rechtwinkeliges Prisma, so sieht man

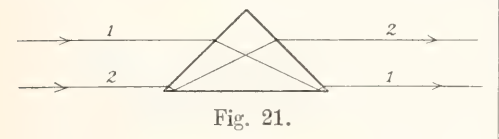


Fig. 21.

sein eigenes Spiegelbild in voller Lichtstärke, wie es durch keinen Silberspiegel heller wiedergegeben werden kann, da stets Totalreflexion eintritt. Zwei Besonderheiten fallen aber bei diesem Spiegelbild auf. Es bleibt unbewegt an seinem Orte, wenn wir auch das Prisma um eine Achse parallel der Schnittlinie der Kathetenflächen hin- und herbewegen und unser Spiegelbild ist nicht symmetrisch zu uns, sondern vollkommen kongruent. Wenn wir unser rechtes Auge schließen, schließt auch das Spiegelbild sein rechtes Auge, was einen überraschenden Eindruck macht, wenn man es zum ersten Male sieht, was sich aber sehr leicht erklärt, wenn man sich den Strahlenverlauf der von der Hypotenuse auffallenden Strahlen aufzeichnet. Die Verwendung derartiger Prismen findet neuerdings viel in den Prismenfernrohren statt (vgl. den Artikel „Optische Instrumente").

Blickt man von der Kathetenseite in das rechtwinkelige Prisma hinein und beobachtet das an der Hypotenuse gespiegelte Bild, so kann man leicht die Grenze der Totalreflexion erkennen. Bewegt man das Auge in den Winkelraum NMC (Fig. 20) hinein, so erscheint von einer bestimmten Stellung an das Spiegelbild durch eine scharfe Grenze in einen helleren und dunkleren Teil getrennt. Der dunklere Teil liegt dann außerhalb des Gebietes der Totalreflexion und man kann leicht bemerken, daß man in diesem Gebiete auch durch die Hypotenusenfläche hindurchsehen und andere Gegenstände mit farbigen Säumen wahrnehmen kann. Ganz entsprechende Beobachtungen lassen sich auch an Prismen von anderen Winkeln leicht anstellen. Eine besondere Anwendung des totalreflektierenden Prisma in Kombination mit durchfallendem Licht findet sich im Lummer-Brodhunschen Würfel, der in der Photometrie Verwendung findet (vgl. hierzu den Artikel „Photometrie").

Eine andere Anwendung der Totalreflexion findet sich in leuchtenden, oft farbigen Springbrunnen. Leitet man einen Lichtstrahl so, daß er von hinten nahezu in die Achse eines ausströmenden Wasserstrahls gerichtet ist, so trifft er die Wandungen des Strahls von innen stets so, daß Totalreflexion eintreten muß. Das Licht kann also nicht heraustreten, und der Strahl erscheint daher in seiner ganzen Länge von Innen beleuchtet und gewährt dadurch einen magischen Anblick. Auch in Glasstäben von beliebiger Krümmung kann man das Licht, ähnlich wie in einem Sprachrohr den Schall, durch Totalreflexion fortleiten und am Ende austreten lassen und zu örtlichen Beleuchtungen benutzen, ein Mittel das vielfach besonders für medizinische Zwecke benutzt wird.

Da der Grenzwinkel, für den Totalreflexion eintritt, dadurch bestimmt ist, daß der Sinus dieses Winkels gleich dem Reziproken des Brechungsindex ist, denn der Sinus des zugehörigen Austrittswinkels wird gleich eins, so bietet die Bestimmung des Grenzwinkels der Totalreflexion in vielen Fällen ein bequemes Mittel zur Bestimmung des Brechungsindex.

Bei dem Totalreflektometer von Kohlrausch wird der Körper, dessen Brechungsindex gemessen werden soll, in eine Flüssigkeit eingetaucht, deren Brechungsindex jedenfalls größer als der zu messende ist. Der Körper muß mit einer eben geschliffenen Fläche in einer vertikalen Drehungsachse in der Mitte des zylindrischen Gefäßes befestigt sein.

Eine breite leuchtende Fläche Fl wird seitwärts aufgestellt und ihr Spiegelbild (s. Fig. 22) mittels eines kleinen Fernrohrs F beobachtet. Dieses erscheint durch eine scharfe Grenzlinie in einen hellen und einen dunkleren Teil getrennt. Auf diese

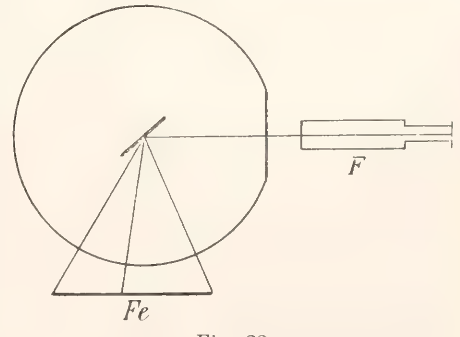


Fig. 22.

Grenzlinie wird durch Drehung des Körpers eingestellt, und der Grenzwinkel der Totalreflexion an einem mit der Drehachse verbundenen Teilkreis abgelesen. Durch Eintauchen einer Glasdoppelplatte mit dazwischenliegender Luftschicht kann man auch den Brechungsindex der Flüssigkeit gegen Luft mit dem gleichen Apparat bestimmen.

Im Refraktometer von Czapki wird eine gläserne Halbkugel mit horizontaler Oberfläche verwendet, auf die der zu bestimmende Körper mit eben geschliffener Fläche vermittels eines Tropfen hochbrechender Flüssigkeit aufgebracht wird (Fig. 23). Beobachtet wird mit einem kleinen

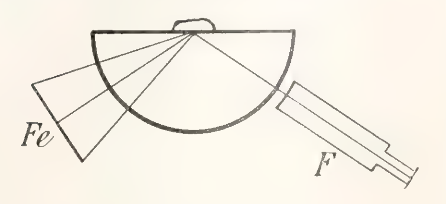


Fig. 23.

Fernrohr, das um den Mittelpunkt der Kugel drehbar ist und dessen Objektivlinse mit einer Fläche endet, die der Krümmung der Halbkugel konform ist. Beleuchtet wird wieder mit einer breiten Lichtquelle (Fl) und mit dem Fernrohr auf die Grenze der Totalreflexion eingestellt.

Verwandte Apparate sind die Refraktometer von Abbe und Pulfrich; doch wird bei diesen nicht eigentlich die Totalreflexion selbst, sondern es wird durchdringendes Licht benutzt und es wird die Grenze bestimmt, bis zu der das Licht bei streifendem Eintritt noch in das optisch dichtere Medium eindringen kann. Während man bei Verwendung reiner Totalreflexion eine Grenze zwischen einem helleren und einem dunkleren Feld hat, hat man beim streifenden Eintritt eine Grenze zwischen hell und vollkommen dunkel. Die Refraktometer von Abbe und Pulfrich gestatten daher eine schärfere Einstellung auf die Grenze, setzen dafür aber voraus, daß der zu prüfende Körper einigermaßen lichtdurchlässig ist, während bei den Apparaten von Kohlrausch und Czapki die Durchlässigkeit der Körper nicht in Frage kommt.

5. Metallreflexion. Die Metalle nehmen bei den Erscheinungen der Lichtreflexion deswegen eine besondere Rolle ein, weil bei ihnen die Intensität des reflektierten Lichtes unter allen Umständen wesentlich größer ist als bei den übrigen Körpern und oftmals der Intensität des totalreflektierten Lichtes sehr nahe kommt.

Die hohe Intensität des reflektierten Lichtes ist es, die uns von „Metallglanz“ sprechen läßt, und in allen den Fällen, wo wir ähnliche Intensitäten bei der Reflexion wahrnehmen, das ist z. B. bei der Totalreflexion an den Grenzen zweier aufeinandergeschichteter Flüssigkeiten, drücken wir dies auch dadurch aus, daß wir sagen: die Grenzfläche glänzt metallisch. Weiter ist der Metallglanz dadurch bemerkenswert, daß er farbig ist, oder doch sein kann, obwohl das reflektierte Licht nur von der Oberfläche reflektiert ist, oder doch nur in ganz minimale Tiefen eingedrungen sein kann. Von einer merklichen Reflexion aus dem Innern der Metalle heraus, wie bei den gewöhnlichen farbigen Körpern kann hier nicht die Rede sein, da die Metalle überhaupt nur in äußerst dünnen Schichten, deren Dicke mit der Wellenlänge des Lichtes vergleichbar ist, geringe Mengen des Lichtes hindurchtreten lassen. Die Farbe des Metallglanzes wird auch schon sichtbar bei vollständig glatt polierten ebenen Flächen und ist in den klaren Spiegelbildern wahrzunehmen, während sonst die Farbe der Körper als diffuse Lichtzurückwerfung sich darstellt. Farbigen Metallglanz finden wir übrigens nicht nur bei Metallen, sondern auch bei einigen sehr stark färbenden Substanzen teils in Kristallform, teils in der Oberfläche sehr konzentrierter Lösungen. Das Wesentliche für das Zustandekommen des Metallglanzes ist stets, daß die betreffende Substanz wenigstens eine gewisse Zone im Spektrum des auffallenden Lichtes in Schichten von wenigen Wellenlängen Dicke schon vollständig absorbiert. Diese Farbenzone, die also so gut wie gar nicht in die Substanz vorzudringen vermag, wird fast vollständig reflektiert, und gibt dem zurückgeworfenen Licht die hohe Intensität. Stellen wir daher eine solche Substanz in äußerst dünner Schicht her, z. B. indem wir eine konzentrierte Fuchsinlösung über eine Glasplatte fließen und eintrocknen lassen, so muß in dem hindurchtretenden Licht die Zone des stark reflektierten Lichtes fehlen. In der Tat zeigt eine solche Fuchsinschicht grünen Metallglanz und erscheint in der Durchsicht rot. Genau das Entsprechende beobachten wir bei Gold, das in sehr dünnen Schichten blau durchscheint und gelb glänzt; Kupfer scheint grün durch und glänzt rot.

Außer Gold und Kupfer haben die Metalle einen weißen oder grauen Metallglanz, mit nur sehr geringem Farbenton, nur unter den Legierungen finden sich einige mit ausgesprochener Färbung, Messing, Rotguß u. ä. Ganz fehlt die Farbe im Metallglanz aber nur selten, am vollständigsten beim Silber. Den Farbenton des Metalles kann man mehr hervortreten lassen, sobald man das Licht mehrfach zwischen gleichen Metallflächen

hin- und her reflektieren läßt. Es wird dann Nickel deutlich gelb glänzend, Zink dagegen blau; Stahl ist bei senkrechtem Einfall rötlich, bei schrägem blau.

Unter allen Umständen ist die Intensität des reflektierten Lichtes bei Metallen bei allen Einfallswinkeln sehr groß. Wenn sie auch von der Größe des Einfallswinkels abhängt, so würde eine graphische Darstellung der Abhängigkeit der Intensität des reflektierten Lichtes vom Einfallswinkel, wie sie im Artikel „Lichtpolarisation" in Figur 1 für gewöhnliches reflektiertes Licht gegeben ist, doch nur eine ganz schwach gekrümmte Kurve geben, die ganz oben in der Figur liegen müßte. Der Grund hierfür geht auch aus den weiter unten mitgeteilten Formeln dadurch hervor, daß diese im Zähler und Nenner in gleicher Weise Glieder mit k enthalten, und k bedeutet die Stärke der Absorption, die ja gerade hier sehr groß ist.

Weiter ist charakteristisch, daß bei polarisiertem einfallenden Licht das reflektierte Licht elliptisch polarisiert ist (vgl. den Artikel „Lichtpolarisation"). Nur wenn das einfallende Licht in der Einfallsebene oder senkrecht dazu polarisiert ist, ist auch, das reflektierte Licht in der gleichen Ebene linear polarisiert. Ist das einfallende Licht natürliches Licht, so ist das reflektierte Licht natürliches mit elliptisch polarisiertem gemischt.

Bei der Reflexion an einer Metallfläche gibt es stets einen Einfallswinkel für natürliches Licht, bei dem der Anteil des elliptisch polarisierten Lichtes im reflektierten am größten ist; dieser ist der Haupteinfallswinkel. Dieser Einfallswinkel entspricht bei den Metallen also in gewissem Grade dem Einfallswinkel, unter den bei den übrigen Körpern das reflektierte Licht nach dem Brewsterschen Gesetz vollständig linear polarisiert ist. Während bei letzteren die senkrecht zur Einfallsebene polarisierte Komponente bei diesem Winkel ganz fortfällt, hat sie bei den Metallen auch bei dem Haupteinfallswinkel noch immer einen sehr großen Wert. Betrachtet man das reflektierte Licht durch einen Nicol in solcher Stellung, daß das in der Einfallsebene polarisierte Licht ausgelöscht wird, so zeigt das senkrecht dazu schwingende Licht noch immer eine solche Intensität, daß selbst bei sehr stark farbigem Metallglanz noch keine auffallende Aenderung des Farbentons wahrzunehmen ist (vgl. hierzu den Artikel „Farbe"). Charakteristisch für die Reflexion beim Haupteinfallswinkel ist ferner, daß dann die Phasenverschiebung zwischen den beiden Komponenten im reflektierten Licht gerade $\frac{\pi}{2}$ ist, wie durch einen Babinetschen Kompensator (vgl. den Artikel „Lichtpolarisation") nachgewiesen werden kann. Bei streifendem Eintritt wird diese Phasendifferenz gleich 0 und bei senkrechtem gleich π; also in diesen beiden extremen Fällen tritt bei der Reflexion ebenfalls linearpolarisiertes Licht auf, wenn das einfallende linear polarisiert war.

Um die Erscheinungen der Metallreflexion vollständig zu verstehen, muß auf die vollständigen Reflexionsformeln eingegangen werden. In dem Artikel „Lichtpolarisation" findet sich die Besprechung der Fresnelschen Reflexionsgesetze vom Standpunkt der elektromagnetischen Lichttheorie. Die dort aufgeführten Ueberlegungen bedürfen für die Metalle einer Ergänzung, denn bei den dortigen Ableitungen ist nur von den einfachen Maxwellschen Gleichungen ausgegangen, in denen ein Glied mit dem elektrischen Leitvermögen der Substanz nicht vorkommt, da dieses gleich Null gesetzt ist. Die Metalle besitzen aber gerade ein gutes elektrisches Leitvermögen, so daß die Maxwellschen Gleichungen in der vollständigen Form:

$$\frac{\varepsilon}{c}\frac{\partial X}{\partial t} + \sigma X = \frac{\partial \gamma}{\partial y} - \frac{\partial \beta}{\partial z};$$

$$\frac{1}{c}\frac{\partial \alpha}{\partial t} = \frac{\partial Y}{\partial z} - \frac{\partial Z}{\partial y}$$

(und entsprechende vier Gleichungen mit zyklischer Vertauschung der Koordinaten), gebraucht werden müssen. Hier bedeutet X, Y, Z die elektrische Kraft, α, β, γ die magnetische Kraft, ε die Dielektrizitätskonstante, c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, σ das Leitvermögen, die Magnetisierungskonstante ist gleich 1 gesetzt. Das Glied mit σ ist also das neue Glied, das hier hinzukommt und bei der Behandlung der gewöhnlichen Reflexion fehlt.

Drude hat gezeigt, daß man von diesen Gleichungen genau in gleicher Weise, wie bei der Ableitung der Fresnelschen Gleichungen geschah, zu den Reflexionsformeln gelangen kann, wenn man komplexe Variable einführt, auf die man ja auch schon bei der Totalreflexion stößt (vgl. den Artikel „Lichtpolarisation"). Auch die jetzigen Gleichungen können ganz auf die Form der einfachen gebracht werden, indem man als Dielektrizitätskonstante den komplexen Wert $\varepsilon' = \varepsilon - i2\sigma T$, wo T die Schwingungsdauer des Lichtes ist, einführt. Es läßt sich dann für ε' noch eine besondere Deutung angeben. Haben wir senkrecht auf die Metalloberfläche einfallendes Licht, so wird $\varepsilon' = n^2(1 - \varkappa^2 - 2i\varkappa)$. Hier bedeutet n den Brechungsindex des Metalls gegen Luft und $\varkappa$ den Absorptionskoeffizienten. Dieser ist in diesem Zusammenhange so zu verstehen, daß die Amplitude des Lichtes, wenn es in das Metall eindringt und den Weg einer Lichtwelle im Metall zurückgelegt hat, im Verhältnis $e^{-2\pi\varkappa}$ kleiner geworden ist. Die Lichtintensität, die dem Quadrat der Amplitude entspricht, ist also um $e^{-4\pi\varkappa}$ verkleinert. Setzen wir von den beiden Werten für ε' die reellen und imaginären Teile einander entsprechend, so wird $\varepsilon = n^2(1-\varkappa^2)$; $n^2\varkappa = \sigma T$. Vielfach wird vorgezogen, mit einem anderen Absorptionskreffizienten zu rechnen

$k = n\varkappa$, der dann dadurch definiert ist, daß die Lichtschwächung auf den Wert $e^{-2\pi k}$ auf der Strecke einer Wellenlänge des Lichtes im Vakuum, nicht im Metall, erfolgt sein soll. Die Größe k hat den Vorzug, die Kenntnis der Wellenlänge des Lichtes im Metall, also des Brechungsindex, nicht vorauszusetzen, und dadurch der direkten Messung zugänglich zu sein. Mit der Größe k lauten die letzten Gleichungen $\varepsilon = n^2 - k^2$ $nk = \sigma T$.

Bei dieser Ableitung ist k und $\varkappa$ zunächst nur definiert worden, für senkrecht einfallendes Licht. Für unter beliebigem Winkel φ einfallendes Licht läßt sich ebenfalls ein Absorptionskoeffizient $k\varphi$ angeben, der aber einen anderen, von φ abhängigen Wert hat. Durch diese Abhängigkeit vom Einfallswinkel werden naturgemäß die Formeln für die Intensität des reflektierten Lichtes jetzt sehr verwickelt. Die wesentlichsten Beziehungen, die dabei auftreten, sind folgende:

Ist das einfallende Licht parallel der Einfallsebene polarisiert und von der Intensität I, so ist das reflektierte Licht ebenfalls in der Einfallsebene polarisiert, und seine Intensität ist dann

$$I_p = \frac{\sin^2(\varphi - \chi) + k^2\varphi \sin^2\chi}{\sin^2(\varphi + \chi) + k^2\varphi \sin^2\chi} \cdot I.$$

Der Winkel χ ist dabei der Brechungswinkel im Metall.

Ist das einfallende Licht senkrecht zur Einfallsebene polarisiert, so ist auch das reflektierte senkrecht zur Einfallsebene polarisiert und seine Intensität ist

$$I_s = \frac{\cos^2(\varphi - \chi)\, tg^2\varphi + k^2\varphi \sin^2\chi}{\cos^2(\varphi + \chi)\, tg^2\varphi + k^2\varphi \sin^2\chi} \cdot I_p$$

wo für I_p noch der obenstehende Ausdruck einzusetzen ist.

Außer diesen Intensitätsänderungen erfährt das Licht in diesen beiden Fällen bei der Reflexion auch noch eine Phasenänderung, und zwar für beide Fälle eine verschiedene. Dies war ja schon zu erwarten, weil das Problem erst durch die Einführung der komplexen Größen in die lösbare Form gebracht wurde. Wenn daher jetzt ein Lichtstrahl unter dem Winkel φ einfällt, der in einer beliebigen Ebene, die mit der Einfallsebene den Winkel α bildet (Azimut), polarisiert ist, so können wir uns diesen Strahl in zwei zerlegt denken, die parallel und senkrecht zur Einfallsebene polarisiert sind. Infolge der ungleichen Intensitätsänderung nach obigen Formeln wird das Azimut β des reflektierten Strahls ein anderes sein müssen als das des einfallenden, aber da gleichzeitig beide Teile ungleiche Phasenverschiebungen erlitten haben, so bleibt eine Phasendifferenz δ zwischen den Teilen des reflektierten Strahles übrig und dieser ist daher elliptisch polarisiert. Von einem bestimmten Azimut des reflektierten Strahls können wir daher erst reden, wenn wir durch ein besonderes Hilfsmittel bei der Beobachtung, Babinetscher Kompensator (vgl. den Artikel „Doppelbrechung"), die Phasenverschiebung ausgeglichen haben. Dann erhalten wir das Azimut β der „wiederhergestellten Polarisation".

Ist der einfallende Lichtstrahl unter dem Azimute $\alpha = 45^0$ polarisiert und beobachtet man an dem reflektierten Strahl das Azimut β der wiederhergestellten Polarisation und durch Ablesung am Babinetschen Kompensator die Phasenverschiebung δ und den Einfallswinkel φ, so lassen sich aus diesen Daten die Konstanten k und n des Metalls nach den Entwickelungen von Drude durch folgende Gleichungen ausrechnen

$$\frac{k}{n} = \sin\delta\, tg\, 2\beta;\quad n = \sin\varphi\, tg\,\varphi\, \frac{\cos 2\beta}{1 + \cos\delta \sin 2\beta}$$

$$n^2 + k^2 = \sin^2\varphi\, tg^2\varphi \cdot \frac{1 - \cos\delta \sin 2\beta}{1 + \cos\delta \sin 2\beta}$$

Die Größe der Phasenverschiebung δ hängt ab vom Einfallswinkel φ, und zwar ist für $\varphi = 0$ (senkrechter Einfall) $\delta = \pi$ und für $\varphi = 90^0$ (streifender Eintritt) $\delta = 0$. Dazwischen liegt eine Richtung, in welcher $\delta = \frac{\pi}{2}$ wird; dieser Einfallswinkel heißt der Haupteinfallswinkel und sei mit $\bar{\varphi}$ bezeichnet. Ist bei diesem Winkel φ das Einfallsazimuth $\alpha = 45^0$, so heißt das Azimut des wiederhergestellten reflektierten Strahls das Hauptazimut und sei mit β bezeichnet. Drude hat dann folgende Zahlenwerte für verschiedene Metalle für gelbes Licht gefunden:

	k	n	$\bar{\varphi}$	β
Silber	3,67	0,18	75° 42′	43° 35′
Gold	2 82	0,37	72° 18′	41° 39′
Platin	4,26	2,06	78° 30′	32° 35′
Kupfer	2,62	0,64	71° 35′	38° 57′
Stahl	3,40	2,41	77° 3′	27° 49′
Natrium	2,61	0,005	71° 19′	44° 58′
Quecksilber	4,96	1,73	79° 34′	35° 43′

Ist das einfallende Licht natürliches (unpolarisiertes), Licht so haben wir es als zur Hälfte parallel, zur anderen Hälfte senkrecht zur Einfallsebene polarisiert anzusehen und wenden auf beide Hälften die beiden oben angeführten Formeln für die Intensität des reflektierten Lichtes an. Es zeigt sich, daß das reflektierte Licht bei keinem Einfallswinkel vollständig polarisiert sein kann. Es erscheint stets als natürliches Licht, dem ein gewisser Anteil polarisierten Lichtes beigemischt ist. Beim Haupteinfallswinkel erreicht dieser polarisierte Teil seinen größten Wert. Da die Größen k, $k\varphi$ und n bei allen diesen Formeln auch noch von der Wellenlänge abhängen, so ergibt sich, daß die Intensitäten des reflektierten Lichtes auch noch durch die Farbe bestimmt sind, so daß also auch bei einfallendem weißen Licht die Farbe des reflektierten Lichtes vom Eintrittswinkel abhängen muß. Näheres hierüber siehe in dem Artikel „Farben".

Wenn das Licht senkrecht einfällt, $\varphi = 0$, so vereinfachen sich die Reflexionsformeln und ergeben für die Intensität I_r des reflektierten Lichtes, unabhängig vom Polarisationszustand, wenn die Intensität des einfallenden Lichtes gleich Eins gesetzt wird

$$I_r = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}.$$

Der Wert von I_r heißt auch das Reflexionsvermögen des Metalls und wird von Drude angegeben zu:

95,3 % für Silber
85,1 „ „ Gold
70,1 „ „ Platin
73,2 „ „ Kupfer
58,5 „ „ Stahl
99,7 „ „ Natrium
78,4 „ „ Quecksilber

Die großen Werte dieses Reflexionsvermögens bedingen den Glanz des reflektierten Lichtes, Metallglanz. Alle diese Zahlen werden übrigens in hohem Grade beeinflußt von geringen Verunreinigungen der Metalloberfläche.

Da der Absorptionskoeffizient k in sehr merklichem Grade von der Wellenlänge abzuhängen pflegt, so ergibt sich, daß, wenn man den Lichtstrahl zwischen zwei parallelen Metallspiegeln hin und her reflektieren läßt, die Farbe, für die k am größten ist, immer mehr hervortreten muß, da ihre Intensität bei der Reflexion am wenigsten abnimmt. Durch derartige mehrfache Reflexion kann man daher die Eigenfarbe des Metallglanzes, z. B. beim Gold und Kupfer bedeutend mehr hervortreten lassen.

Vergleicht man schließlich noch die optischen Konstanten k und n, wie sie durch die Messungen an reflektierten Lichtstrahlen ermittelt worden sind, und wie sie in gleicher Weise durch direkte Absorptionsmessungen und durch prismatische Ablenkung (nach Kundt) gefunden wurden, mit der Deutung, die diesen Werten nach der elektromagnetischen Lichttheorie gegeben werden muß und die durch die oben bereits angeführten Formeln $\varepsilon = n^2 - k^2$ und $nk = \sigma T$ ausgedrückt werden, so findet man zunächst sehr schlechte Uebereinstimmung. ε bedeutet die Dielektrizitätskonstante und da k nach den oben angeführten Zahlen stets größer als n ist, so würde ein negativer Wert von ε sich ergeben, was gar keinen Sinn hat. Ebenso ist nk für Quecksilber bedeutend größer als für Silber, während doch das Leitvermögen σ für Silber bedeutend größer als für Quecksilber ist.

Hagen und Rubens haben daher die optischen Eigenschaften der Metalle für wesentlich größere Wellenlängen untersucht, als im Gebiet der sichtbaren Strahlen vorkommen. Sie erhielten sehr einfache Formeln durch folgende Vereinfachungen. Aus $\varepsilon = n^2 - k^2$ und $n^2k^2 = \sigma^2T^2$ folgt zunächst $k^2 = -\frac{1}{2}\varepsilon + \sqrt{\frac{1}{4}\varepsilon^2 + \sigma^2T^2}$ und $n^2 = +\frac{1}{2}\varepsilon + \sqrt{\frac{1}{4}\varepsilon^2 + \sigma^2T^2}$. Nun bedeutet in den Maxwellschen Gleichungen, wie sie oben hingeschrieben wurden σ das elektrische Leitvermögen im absoluten elektrostatischen Maßsystem. Für das schlecht leitende Quecksilber ist aber σ schon gleich $9.56 . 10^{15}$. Es ist ferner $T = \frac{\lambda}{c} = \frac{\lambda}{3 . 10^{10}}$. Es wird also σT für Quecksilber gleich $9{,}56 . 10^5 \lambda$. Benutzen wir also recht große Wellenlängen von der Ordnung $\lambda = 10\mu = 10^{-3}$ cm, so nimmt σT Werte an, die mehrere hundert Einheiten betragen. Diesen großen Zahlen gegenüber kann aber sowohl $\frac{1}{2}\varepsilon$ in den Formeln für k^2 und n^2 also auch 1 in der Formel für J_r vernachlässigt werden. Dann wird aber einfach $n = k = \sqrt{\sigma T}$ und

$$J_r = 1 - \frac{2}{\sqrt{\sigma T}} = 1 - 2\sqrt{\frac{3 . 10^{10}}{\sigma\lambda}}.$$

Auch der Wert von J_r wurde von Hagen und Rubens in ihrer abschließenden Arbeit nicht mehr direkt gemessen, da derselbe bei allen Metallen sehr nahe gleich der Einheit zu erwarten war, und deswegen der Unterschied für die verschiedenen Metalle nicht deutlich hervorgetreten wäre. Sie bestimmten vielmehr direkt die Differenz $1 - J_r$, d. h. den Betrag, der absorbiert wurde; und diesen Betrag konnten sie finden durch die Ueberlegung, daß nach dem Kirchhoffschen Gesetz die Emission und die Absorption einander genau entsprechen mußten. Die Emission von Strahlen der großen Wellenlängen wurden für die verschiedenen Metalle dadurch bestimmt, daß aus der Strahlung, die bei einer bestimmten Temperatur (170°) von der Metallfläche ausgesandt wurde, nach der Reststrahlenmethode (siehe weiter unten) die großen Wellenlängen ausgesondert wurden, und ihre Intensität mit der Intensität der Strahlung gleicher Wellenlänge, die von einem schwarzen Körper ausging, verglichen wurde. Es fand sich so für alle untersuchten Metalle außer Wismut (Ag, Ca, Au, Al, Zn, Cd, Pt, Ni, St, Fe, Hg, Rotguß, Mangamin, Constantan, Patentnickel), für die Wellenlängen $\lambda = 25{,}5\,\mu$ und $\lambda = 12\,\mu$ sehr gute Uebereinstimmung mit der Formel

$$E = 1 - J_r = 2\sqrt{\frac{3 . 10^{10}}{\sigma\lambda}}.$$

Die Messungen waren so sicher und genau, daß aus den Messungen des Emissionsvermögens direkt das Leitvermögen des Metalls bei der gleichen Temperatur ermittelt werden konnte. Ganz besondere Sorgfalt mußte allerdings dabei auf die Herstellung absolut reiner Metalloberflächen verwandt werden. Bei $\lambda = 4\,\mu$ zeigten sich schon merkliche Abweichungen und bei noch kleineren Wellenlängen, besonders den Wellenlängen des sichtbaren Lichtes versagt die Formel für E und J_r vollständig. Der Grund für dies Versagen der Formel liegt darin, daß alle aus den Maxwellschen Gleichungen unmittelbar gewonnenen Beziehungen stets nur soweit Gültigkeit haben können, als Unterschiede in der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes verschiedener Wellenlänge, also Dis-

persion, nicht in Frage kommen, denn die Maxwellschen Gleichungen allein führen noch nicht zur Erklärung der Dispersion. Solange die Schwingungen langsam, die Wellenlängen groß im Vergleich zu den Eigenschwingungen der Moleküle sind, ist eine solche Außerachtlassung der Dispersion zulässig. Nach den Versuchen von Hagen und Rubens trifft dies offenbar zu für die untersuchten Metalle außer Wismuth bis $\lambda = 12\,\mu$ und ungenähert noch bis $\lambda = 4\,\mu$, dann aber fangen offenbar die Eigenschwingungen der Moleküle an, die einfachen Verhältnisse der elektromagnetischen Theorie störend zu beeinflussen. Man kann dies auch so aussprechen: nur bis zu diesen großen Wellenlängen ist das Absorptionsvermögen einfach durch das elektrische Leitvermögen des Metalls bestimmt, bei den kleineren Wellen fangen die Eigenchwingungen der Moleküle an, einen merklichen Teil der Absorption auszumachen.

6. Reststrahlen. Die metallische Reflexion ist dadurch charakterisiert, daß die reflektierende Substanz die auffallenden Strahlen stark absorbiert, und zwar so stark, daß die Absorption bereits auf der Strecke einer Wellenlänge einen merklichen Wert erreicht.

Diese stark absorbierten Strahlen werden zugleich sehr stark reflektiert; dadurch entsteht der metallische Glanz. Da die metallische Reflexion sich in vielen Fällen auf ein bestimmtes Spektralgebiet beschränkt, so wird bei mehrfacher Reflexion zwischen Platten aus dem gleichen Material im reflektierten Licht diese Zone des gesamten Spektrums immer mehr hervortreten, so daß sich hierin eine Möglichkeit bietet, die metallisch reflektierten Strahlen von den übrigen mehr und mehr zu trennen; sie schließlich fast ganz auszusondern. Hierauf gründet sich eine Methode, ein beliebiges Material daraufhin zu prüfen, ob es in irgendeinem Gebiet des nicht sichtbaren Spektrums gewisse Strahlen metallisch reflektiert. Man lasse das Licht der Lichtquelle L (Fig. 24) von den Platten P_1, P_2, P_3, P_4 der zu prüfenden Substanz reflektieren, dann erreicht es den Hohlspiegel H und wird von diesem nach T hin konzentriert. Hier ist ein Instrument aufzustellen, das die Strahlungsintensität möglichst empfindlich nachzuweisen vermag, eine Thermosäule oder ein Bolometer. Besitzt die Substanz für ein bestimmtes Gebiet metallische Reflexion, so wird dieses Gebiet, nur wenig geschwächt in T zur Wirkung kommen, während alle anderen Strahlen durch die Reflexionen wesentlich an Intensität verloren haben. Bestimmt man noch durch ein Beugungsgitter oder prismatische Zerlegung durch ein Prisma bekannter Dispersion die Wellenlänge der in T wesentlich wirksamen Strahlen, so ist das Gebiet der metallischen Reflexion bei der betreffenden Substanz festgelegt. Diese Strahlen, die so bei mehrfacher Reflexion übrig bleiben, sind von Rubens Reststrahlen genannt.

Die Reststrahlen haben insofern besonderes wissenschaftliches Interesse gewonnen, als sich aus theoretischen Gründen erwarten ließ, daß alle Substanzen ein Gebiet metallischer Reflexion im Ultrarot haben müssen. Da diese Reststrahlen zum Teil im äußersten Ultrarot auftreten, so gibt die Reststrahlenmethode zugleich ein Mittel, Strahlen sehr langwelligen Lichtes nachzuweisen und zu isolieren. Es hat sich dadurch nachweisen lassen, daß in der Strahlung eines heißen Körpers noch Wellenlängen von fast 0,01 mm vorkommen. Das ist um so bedeutsamer, als bis zur Größe von 0,5 mm bereits elektrische Wellen sicher hergestellt werden konnten, so daß das Gebiet der elektrischen Wellen schon fast bis an das Gebiet der von heißen Körpern emittierten Wellen heranreicht.

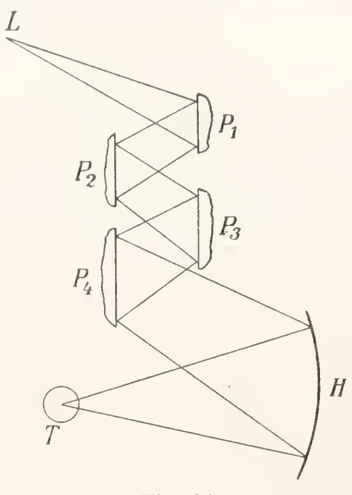


Fig. 24.

Der theoretische Weg, der zu den Reststrahlen geführt hat, ist folgender: die Theorien der Dispersion nach Ketteler und Helmholtz führen für den Brechungsindex einer beliebigen Substanz zu der Formel

$$n^2 = b^2 \frac{M_1}{\lambda^2 - \lambda_1^2} + \frac{M_2}{\lambda^2 - \lambda_2^2}.$$

Hier bedeutet n den Brechungsindex und λ die Wellenlänge, die übrigen Größen sind Konstanten. Es zeigt sich nun, daß der Größe λ_2 die Deutung gegeben werden kann, daß sie die Wellenlänge im Ultrarot darstellt, für die die Substanz vollkommen absorbiert. Oder man kann auch umgekehrt

schließen, alle Substanzen, für die diese Dispersionsformel gilt, und das scheint ganz allgemein der Fall zu sein, haben im Gebiet der langwelligen Strahlen ein Gebiet sehr starker Absorption. Sowie aber die Absportion sehr stark wird, so muß auch das Reflexionsvermögen für diese Wellenlänge sehr stark werden; es muß in diesem Gebiet metallische Reflexion eintreten. Das veranlaßte Rubens, das Licht einer starken Lichtquelle (Auerbrenner erwies sich als besonders geeignet) zwischen Platten einer Substanz, deren Dispersionskurve vorher bestimmt war (Quarz, Flußspat, Steinsalz, Sylvin), mehrfach hin und her reflektieren zu lassen und so die metallisch reflektierten Strahlen auszusondern. Es zeigte sich in der Tat, daß bei den untersuchten Substanzen solche Reststrahlen zu erhalten waren; ihre Wellenlänge wurde durch Messungen von einem Gitter und später durch eine besondere Interferenzmethode bestimmt und in befriedigender Uebereinstimmung mit der Dispersionsformel gefunden. Die genaueren Messungen stellten allerdings meist zwei Absorptionsstreifen im Ultrarot fest, so daß danach die Dispersionsformel noch durch ein Glied $\frac{M_3}{\lambda^2 - \lambda_3^2}$ erweitert werden müßte, um der Erfahrung ganz zu genügen. Die gemessenen Wellenlängen für die Reststrahlen waren

Reststrahlen von	Wellenlängen in λ_2	λ_3	λ_0
Quarz	8,50 9,02	20,75	
Flußspat	24,4		
Steinsalz	53,6	43,9	51,7
Sylvin	62,0	70,3	63,4
Bromkalium . . .	86,5	75,6	82,8
Jodkalium			96,7

Die Wellenlängen λ_0 sind die mittleren Wellenlängen zwischen λ_2 und λ_3, wie man sie erhält, wenn man sie mit weniger scharfen Mitteln beobachtet, die die beiden verschiedenen Absorptionsstreifen nicht zu trennen vermögen.

Indem Rubens dann weiter sowohl das Absorptions- als auch das Reflexionsvermögen einer Reihe von Substanzen für diese verschiedenen Reststrahlen bestimmte, konnte er bestätigen, daß in der Tat jede Substanz im Gebiet der eigenen Reststrahlen stärkste Absorption und Reflexion besitzt, daß aber sowohl diesseits als auch jenseits dieses Gebietes die Durchlässigkeit wieder zunimmt.

Die Reststrahlen des Jodkaliums von der Wellenlänge 96,7 μ oder 0,0967 mm, also fast $^1/_{10}$ mm, sind die langwelligsten Strahlen, die im Emissionsspektrum eines glühenden Körpers bisher haben nachgewiesen werden konnten.

Literatur. ***Drude***, *Lehrbuch der Optik II. Aufl., Leipzig 1906.* — ***Wüllner***, *Lehrbuch der Experimentalphysik V. Aufl. Bd. IV, Leipzig 1899.* — ***Chwolsen***, *Lehrbuch der Experimentalphysik Bd. II, Braunschweig 1905.* — ***Winkelmann***, *Handbuch der Physik II. Aufl. Bd. VI, Leipzig 1906.* — ***Müller-Pouillet***, *Lehrb. der Physik 9. Aufl. Bd. II, Braunschweig 1906.* — ***Ketteler***, *Theoretische Optik, Braunschweig 1858.* — ***H. Rubens*** *Wiedemanns Annalen, Bd. 51, 54, 69, 65, 67, 60.*

J. Classen.

Lieberkühn
Johann Nathanael.

Geboren am 5. September 1711 in Berlin; gestorben am 7. Oktober 1756 daselbst. Er war für den geistlichen Stand bestimmt, wandte sich dann aber schon während seiner Studienzeit der Naturwissenschaft und der Medizin zu. Lieberkühn verband mit einer ungewöhnlichen Beobachtungsgabe ein eminentes technisches Talent, das ihn befähigte, sich alle seine Apparate, auch die mikroskopischen, selbst anzufertigen. Zu bedauern ist es, daß eine ausgedehnte ärztliche Praxis seine wissenschaftlich-literarische Tätigkeit hemmte. Seine bedeutendste Schrift ist die über die Darmzotten De fabrica et actione villorum intestinorum tenium (1745). Drei meisterhaft ausgeführte Tafeln dieses Werkes sind von dem damals als Kupferstecher bekannten Lyonnet nach Zeichnung unter dem Mikroskope ausgeführt worden. Die in diesem Werke zuerst beschriebenen drüsigen Organe der Dünndarmschleimhaut haben Lieberkühns Namen in der Wissenschaft fortleben lassen. Berühmt ist Lieberkühn auch noch durch seine in höchster Vollendung hergestellten Gefäßinjektionspräparate geworden, für deren Studium er gleichzeitig katadioptrische Mikroskope anfertigte. Seine Präparate werden noch heute in anatomischen Sammlungen aufbewahrt.

Seine Schriften sind von Sheldon 1782 gesammelt und herausgegeben worden.

Literatur. *Allgemeine Deutsche Biographie 1883.*

W. Harms.

Liebig
Justus.

Geboren am 12. Mai 1803 in Darmstadt, gestorben am 18. April 1873 in München, ist mit Recht der größte Chemiker Deutschlands genannt worden. Erst im Jahre 1909 wurde ihm ein seiner würdiges biographisches Denkmal errichtet, in dem ausgezeichneten Werke von J. Volhard Justus von Liebig (Leipzig 2 Bde). Es kann als Quellenwerk ersten Ranges bezeichnet und benutzt werden.

Liebig fühlte sich schon in frühen Jahren mit unwiderstehlicher Gewalt zur Chemie hingezogen. Er experimentierte auf eigene Faust

mit gefährlichen Stoffen, so daß er die Apotheke, in die er als Lehrling eingetreten war, verlassen mußte: ein Glück für die Wissenschaft, der er sich fortan mit glühendem Eifer widmete. Nachdem er in Bonn und Erlangen ohne besonderen Erfolg studiert hatte, da ihm der ihm kongeniale Unterricht nicht zuteil wurde, fand er in Paris den rechten Boden zu seiner Weiterentwickelung. Durch Alexander von Humboldt trat er Gay Lussac nahe, und nun folgt eine wissenschaftliche Tat der anderen. So wurde der Einundzwanzigjährige außerordentlicher Professor in Gießen, mit 24 Jahren Ordinarius. Hier begründete er den chemischen Unterricht in der Form, die ihm bis jetzt geblieben ist. Seine Tätigkeit als Lehrer, Forscher und Schriftsteller erreichte eine kaum begreifliche Höhe. So war es erklärlich, daß er nach achtundzwanzigjährigem Wirken in Gießen sich entschloß, nach München zu gehen, um der aufreibenden Laboratoriumstätigkeit zu entsagen und den Schwerpunkt in seine Forschungen und seine Vorträge zu legen. Aus der Liebigschen Schule, die vollständig mit seiner Persönlichkeit und seiner Unterrichtsmethode verwachsen war, gingen die bekanntesten Lehrer der Chemie hervor: Frankland, Fresenius, Gerhardt, A. W. Hofmann, Kekulé, Strecker, Volhard, Williamson, Wurtz und mancher andere.

Die Liebig im höchsten Maße eigene Anlage, „in Erscheinungen zu denken", wußte er in seinen begabten Schülern zu entwickeln. Durch Wort und Schrift hat er auf seine Zeitgenossen einen gewaltigen Einfluß ausgeübt, nicht nur in rein wissenschaftlicher Richtung, auch in echt populär gehaltenen Vorträgen sowie Schriften, besonders seinen chemischen Briefen, die gesunde chemische Gedanken und Kenntnisse in weiteste Kreise getragen haben.

Liebigs wissenschaftliche Forschungen sind meist bahnbrechend gewesen; besonders galten sie der organischen Chemie, die er wie kein anderer gefördert hat. Man denke an die grundlegende Verbesserung der Analyse organischer Stoffe, an die Untersuchungen über knallsaure Salze, Aldehyd, Chloral, Acetal und andere aus Alkohol hervorgehende Stoffe. Seine mit Wöhler ausgeführten Arbeiten, besonders seine eigenen Studien über mehrbasische Säuren brachten erstaunlich viel Licht in bisher dunkle Gebiete und erhoben die organische Chemie zur ebenbürtigen Genossin der anorganischen.

Liebig wandte sich gegen Ende der dreißiger Jahre der Erforschung der Ernährung von Tieren und Pflanzen zu. Seine aufklärenden und grundlegenden Untersuchungen über den Stoffwechsel in der belebten Natur haben der neueren Agrikulturchemie, sowie der Physiologie der Pflanzen und Tiere die Bahn gebrochen. Wennauch Liebig in seinen aus den zahlreichen Versuchen erschlossenen Gedanken über die schwierigsten Fragen dieser Forschungsgebiete zuweilen über das Ziel hinausschoß, so sind doch die von ihm geschaffenen Grundlagen erhalten geblieben.

Die Mannigfaltigkeit der von ihm in Angriff genommenen Probleme hat es mit sich gebracht, daß Liebig auch ein Meister der angewandten Chemie wurde. Zahlreiche Beobachtungen wußte er für die Technik zu verwerten, z. B. in der Galvanoplastik sowie bei der Silberverspiegelung. Sein Eindringen in das Wesen der Pflanzenernährung führte ihn zur Aufstellung wichtigster Lehrsätze für den Ackerbau. Die Erforschung der Ernährung des Tieres ließ ihn die Eigenart der Nahrungsmittel und ihren Unterschied von den Genußmitteln erkennen. Die Herstellung des Fleischextraktes, die Kindernahrung sind weitere praktische Folgen seines überall in die Tiefe dringenden Geistes. So ist Liebig im Gebiete des Ackerbaues und der Gesundheitspflege ein Wohltäter der Menschheit geworden.

E. von Meyer.

Liegendes.

Bergmännischer Ausdruck für die unter einem bestimmten Gestein liegenden Schichten (siehe den Artikel „Schichtung").

Limpricht
Heinrich.

Geboren am 21. April 1827 zu Eutin; gestorben am 13. Mai 1909 in Greifswald, wo er seit 1860 bis zum Jahre 1900 als Professor der Chemie mit schönem Erfolg gewirkt hat, nachdem er zuvor in Göttingen als Schüler und Assistent Friedrich Wöhlers seit 1852 als Dozent tätig gewesen war. Eine stattliche Reihe von Schülern, u. a. Beilstein, Fittig, Geuther, O. Hesse, Kraut, R. Otto, H. Schwanert, M. Fleischer, M. Delbrück, M. Märcker, H. Beckurts, v. Pechmann, lassen seinen ersprießlichen Einfluß als Lehrer der Chemie erkennen. Seine Forschungen gehören fast ausschließlich dem Gebiete der organischen Chemie an, und in dieser war es besonders das Gebiet der zyklischen Verbindungen, dem er seine Kraft widmete. Ein Verzeichnis seiner Experimentalarbeiten ist dem liebevoll geschriebenen Nekrolog von Auwers (Ber. 42 5001) angefügt. In den wichtigen Entwickelungsjahren der organischen Chemie 1855 bis 1862 erschien Limprichts Grundriß und sein Lehrbuch der organischen Chemie, in denen er sich wesentlich auf den Boden der Typentheorie stellte, der er als überzeugter Anhänger Geltung zu verschaffen suchte.

E. von Meyer.

Lindley
John.

Botaniker. Geboren am 5. Februar 1799 zu Catton bei Norwich, beschäftigte sich, nach dem Besuch des Gymnasiums seiner Vaterstadt, früh mit Entomologie und namentlich Botanik und Gartenbau. Von besonderer Bedeutung für ihn war seine Bekanntschaft mit William

Hooker, auf dessen Empfehlung er 1819 Gehilfe bei Sir Joseph Banks in London wurde. 1822 wurde er Sekretär-Adjunkt der dortigen Gartenbaugesellschaft. In dieser Stellung und später schließlich bis 1858 als Sekretär erwarb er sich besondere Verdienste um die Gartenbaugesellschaft. 1829 wurde er Professor der Botanik an der Universität London und wirkte als solcher bis 1861. Er starb am 1. November 1865 zu Acton Green bei London. Seine rein botanischen Veröffentlichungen sind meist systematischer Natur und enthalten die Beschreibungen vieler neuer Arten. Unter ihnen sind die über Rosen, Digitalis, Pomaceen, Victoria regia, Orchideen (1830 bis 1840), The vegetable kingdome (1846) u. a. zu erwähnen, besonders waren sie jedoch den Gartenpflanzen gewidmet. Hier seien seine Theorie of horticulture (1840) und der Flower Garden of new or remarkable plants (mit Paxton 3 Bde. 1851/53) sowie seine fünfundzwanzigjährige Redaktion des botanischen Teils von Gardeners Chronicle angeführt. Seine Bestrebungen um den Ausbau des natürlichen Systems (z. B. Nixus plantarum [1833]; A natural system of Botany [1836]) brachten gegenüber Jussieu und de Candolle in mancher Beziehung einen Fortschritt.

W. Ruhland.

Link

Heinrich Friedrich.

Botaniker. Geboren am 2. Februar 1767 zu Hildesheim, studierte von 1786 bis 1790 in Göttingen Medizin und besonders Naturwissenschaften (u. a. auch bei Blumenbach) und wurde 1792 Professor der Naturgeschichte (Chemie, Zoologie und Botanik) in Rostock. 1797 und 1798 bereiste er Portugal mit dem Grafen Hoffmannsegg zum Studium der dortigen, damals wenig bekannten Flora; 1811 wurde er Professor der Botanik und Direktor des Botanischen Gartens in Breslau, und folgte 1815 einem Ruf als Nachfolger Willdenows nach Berlin, wo er am 1. Januar 1851 starb. Link war einer der vielseitigsten und kenntnisreichsten Botaniker seiner Zeit; Entdeckungen von großer Tragweite hat er nicht gemacht. Unter seinen systematischen Veröffentlichungen seien genannt: die Flora von Göttingen (1789), von Rostock (1795), die Flore portugaise (Berlin 1820 mit Graf Hoffmannsegg), die Symbolae ad floram graecam (Linnaea Bd. X), die Arbeiten über Cycadeen (1843 und 1846), über verschiedene Kryptogamen, Flechten (1809), Pilze (1815) und Algen (1820) sowie der Entwurf eines phytologischen Pflanzensystems (1824), in welchem auch die Kryptogamen eingehend berücksichtigt sind. Seine Hauptwerke gehören der anatomischen und physiologischen Richtung an, so die Arbeiten über die Gefäße der Pflanzen (1798 1805 1809 1831), seine Grundlehren der Anatomie und Physiologie der Pflanzen (Göttingen 1807), sein dreibändiges Handbuch (1829 bis 1833), die Anatomia plantarum iconibus illustrata (Berlin 1834 bis 1837), sowie Arbeiten über den Bau der Farnkräuter (1834 bis 1841), über Wurzeln (1797 und 1838) usw. und schließlich seine Philosophie der Botanik (1796) und die Elementa philosophiae botanicae (Berlin 1824 2. Ausg. lateinisch und deutsch 1837). Außerdem ist er der Verfasser einer Anzahl minder wichtiger physikalischer, chemischer, mineralogischer und zoologischer Schriften.

Literatur. *Martius, Gelehrte Anzeigen der kgl. bayer. Akad. d. Wissenschaften, 1851, Bd. 32 S. 474.*

W. Ruhland.

Linné

Carl von.

Botaniker. Geboren am 23. Mai (neuen Stils) 1707 in Råshult (Schweden), studierte von 1727 bis 1728 in Lund und darauf in Upsala Medizin und Naturwissenschaften. Dort begann er, noch als Student, 1730 seine Lehrtätigkeit an der Universität. 1732 unternahm er mit Unterstützung der dortigen Gesellschaft der Wissenschaften eine Reise nach Lappland, studierte noch 2 Jahre und siedelte 1735 nach Harderwigk in Holland über, wo er sehr bald darauf zum Dr. med. promovierte. Er begab sich dann nach Amsterdam und Leyden, wo zuerst sein Systema naturae erschien und wurde noch im selben Jahre Vorsteher des berühmten Cliffordschen botanischen Gartens in Hartecamp. Nach einem vorübergehenden Besuch Englands reiste er 1738 nach Paris, lernte dort viele bedeutende Naturforscher seiner Zeit kennen und kehrte im selben Jahre nach Schweden zurück. Hier lebte er zunächst in Stockholm als vielbeschäftigter Arzt. Dort erfolgte 1739 auf seine Anregung die Stiftung der schwedischen Akademie, deren erster Präsident er wurde. 1741 wurde er in Upsala Professor, wo er ein naturhistorischen Museum schuf, ein großes Privatherbar zusammenbrachte und bis zu seinem Tode am 10. Januar 1778 als weitberühmter Lehrer wirkte.

Linné ist der Schöpfer einer strengebinären Nomenklatur, wenn auch bereits vor ihm Ansätze hierzu gemacht waren, einer zweckmäßigen botanischen Kunstsprache, einer knappen, nur die wirklich unterscheidenden Merkmale hervorhebenden Diagnose, eines künstlichen Pflanzensystems, das wesentlich auf die Zahl und Anordnung der Stamina aufgebaut war, und von dem er selbst hoffte, daß es einmal durch ein natürliches ersetzt werden würde. Er war wesentlich Botaniker, obwohl er in seinen zusammenfassenden Werken auch Zoologie und Mineralogie bearbeitet hat, denen somit seine klassifikatorischen und reformatorischen Bestrebungen ebenfalls zugute kamen. Er hat eine große Zahl neuer Gattungen und Arten beschrieben und die älteren nebst ihren Verwandtschaftsverhältnissen einer umfassenden kritischen Revision unterworfen. In seinen allgemeinen Ansichten stand er auf dem rationalistischen Boden seiner Zeit. Einer genetischen Betrachtung der Natur stand er fremd gegenüber.

Unter seinen zahlreichen Schriften sind zu

nennen: Nuptiae arborum (Upsala 1729), worin er sich mit der Funktion der Blütenteile beschäftigt, die er später seinem System zugrunde legte; sein Hauptwerk Systema naturae, zuerst 1735 auf 11 Folioseiten, in der letzten von ihm selbst besorgten Auflage (1766 bis 1768) 2300 Seiten stark, von dem der erste Band (1766) die Tiere, der zweite (1767) die Pflanzen und der dritte (1768) die Mineralien, sowie einen Nachtrag zu den beiden ersten enthält; ferner seine Genera plantarum (1. Aufl. Leyden 1737); Species plantarum (1. Aufl. Stockholm 1753, 2 Bände, 4. Ausgabe, von Wildenow besorgt, Berlin 1797 bis 1830 6 Bände); Amoenitates academicae (Stockholm und Leipzig 1749 bis 1769 7 Bände); Philosophia botanica (1. Ausgabe Stockholm 1751), die alle nach seinem Tode noch in zahlreichen Neubearbeitungen, Uebersetzungen usw. erschienen; unter den floristischen Arbeiten seien genannt: Flora lapponica (Amsterdam 1737), Flora suecica (Stockholm 1. Ausg. 1745, 2. Ausg. 1755) sowie Flora zeylanica (Stockholm 1747 und Amsterdam 1748).

Literatur. *R. E. Fries in Engl. Botan. Jahrb. XVI 1907 S. 1 bis 54.*

W. Ruhland.

Linguatulidae

Zungenwürmer, unter Pentastomata bei „Arachnoidea“ in Bd. I behandelt.

Linsensysteme.

Geometrische Optik oder Gaußsche Abbildung.

1. Einleitung. Gaußsche Abbildung durch Linsensysteme. Geometrische Optik. Im Artikel „Lichtbrechung“ wird mit Hilfe des Snelliusschen Brechungsgesetzes der Gang eines Lichtstrahles bei der Brechung an ebenen Flächen, an einer Kugelfläche und an einer Fläche kontinuierlicher Krümmung verfolgt. Dabei ergiebt sich, daß im allgemeinen die von einem Punkte ausgegangenen Strahlen nicht wieder nach einem Punkte gebrochen werden. Diejenigen spiegelnden und brechenden Flächen, die sogenannten „aberrationsfreien“ Flächen, welche wenigstens von einem ganz bestimmt gelegenen Punkt ein punktweises Abbild liefern, sind aber für die praktische Optik von wenig Bedeutung.

Beim menschlichen Auge haben wir es mit einem brechenden System zu tun, welches nicht nur einen gewissen Objektpunkt punktweise abbildet, sondern die von einem beliebigen Objektpunkt ausgegangenen Strahlen in wieder einem Punkte vereinigt, wenn auch für gewisse Partien des Gesichtsfeldes die punktweise Abbildung nicht absolut streng ist. Die Verwirklichung einer solchen punktweisen Abbildung ist es, was die praktische Optik interessiert. Unsere Aufgabe lautet daher optische Systeme brechender oder spiegelnder Flächen aufzusuchen, welche die von einem beliebigen Punkt ausgegangenen Strahlen in wieder einem Punkte vereinigt. Wie im Artikel „Abbildungslehre“ gezeigt ist, gibt es kein brechendes System, welches alle Punkte eines ausgedehnten Objektes mittels weitgeöffneter Strahlenkegel abzubilden vermöchte, also erst recht keins, welches alle von einem beliebig gelegenen Punkte ausgegangenen Strahlen zu vereinigen imstande wäre.

Und doch spricht man von einer Abbildung durch Linsensysteme, als ob diesen die Eigenschaft zukäme, zwei Räume ineinander punktweise abzubilden. Tatsächlich erreichen auch die Linsen und Linsensysteme unter sehr beschränkenden Annahmen das hohe Ziel, die von einem Objektpunkte in beliebiger Entfernung ausgegangenen Strahlen in wieder einem Punkte zu vereinigen, aber leider nur auf dem Papier. Die „geometrische Optik“, welche die Abbildung durch Linsen und Linsensysteme umfaßt, geht nämlich von der Voraussetzung aus, daß den Lichtstrahlen eine reale Existenz zukommt und daß immer da, wo das gebrochene Strahlenbüschel rechnerisch sich in einem Punkte schneidet, auch wirklich eine punkt-

weise Lichtkonzentration auftritt. Unter dieser Voraussetzung und unter der Annahme, daß nur Strahlen zur Abbildung beitragen, die mit der Achse der Linse sehr kleine Winkel bilden, verwirklicht eine Linse oder ein Linsensystem eine punktweise Abbildung („Gaußsche" Abbildung). Dies nachzuweisen und die Gesetze der Gaußschen Abbildung herzuleiten, ist die Aufgabe dieses Artikels. In dem Artikel „Abbildungslehre" ist erörtert, inwieweit den Gesetzen der geometrischen Optik und der Gaußschen Abbildung eine physikalische Realität zukommt und welchen Bedingungen die Linsensysteme gehorchen müssen, damit nicht nur auf dem Papier sondern in Wirklichkeit eine punktweise Lichtkonzentration auftritt.

2. Strahlenbüschel. Homozentrische oder punktweise Abbildung. Unter einem „Strahlenbüschel" oder „Strahlenbündel" versteht man einen Teil aller von einem leuchtenden Punkte ausgegangenen Strahlen. Verlaufen die Strahlen in einer Ebene, so spricht man von einem „ebenen" Büschel, verlaufen sie innerhalb eines Kegels, so hat man es mit einem „räumlichen" Büschel zu tun. Der Winkel, den die äußersten Strahlen des Büschels miteinander bilden, heißt der „Oeffnungswinkel" des Strahlenbüschels. Je nach seiner Größe unterscheidet man „weitgeöffnete" oder „enge" Strahlenbüschel.

Jedes faktisch oder in der Verlängerung der Strahlen nach einer der beiden Seiten sich in einem Punkte schneidende Strahlenbüschel heißt homozentrisch; der Schnittpunkt selbst heißt „Vereinigungspunkt." Schneiden sich die Strahlen wirklich oder in der Richtung der Fortpflanzung des Lichtes, so nennt man den Brennpunkt reell, das ihn bildende Strahlenbüschel konvergent. Wenn sich die Strahlen eines Büschels dagegen erst rückwärts (d. h. in entgegengesetzter Richtung der Fortpflanzung des Lichtes) verlängert schneiden, so heißt der Vereinigungspunkt virtuell oder potentiell, das Strahlenbüschel selbst aber divergent. Ein von einem leuchtenden Punkte herrührendes Strahlenbüschel kann daher nur ein divergentes sein; denn beim weiteren Verlauf im gleichen Medium, in dem sich der leuchtende Punkt befindet, kann sich ein solches Strahlenbüschel niemals in der Fortpflanzungsrichtung und rückwärts verlängert, in keinem anderen als dem leuchtenden Punkte schneiden. Um ein solches Strahlenbündel in einem neuen Punkte zu vereinigen, muß dasselbe vorerst an der Grenzfläche zweier Medien eine plötzliche Richtungsänderung seiner einzelnen Strahlen erfahren. Es gibt spiegelnde und brechende Flächen, welche das auffallende Strahlenbüschel so modifizieren, daß es nach der Spiegelung oder Brechung homozentrisch verbleibt, d. h. sich vorwärts oder rückwärts verlängert in einem Punkte schneidet. Man nennt den reellen oder virtuellen Brennpunkt dieses neuen Strahlenbündels den reellen oder virtuellen Bildpunkt des leuchtenden Punktes. Den ganzen Vorgang der Brechung oder Spiegelung eines beliebigen homozentrischen Strahlenbündels in wieder ein homozentrisches Büschel bezeichnet man als Abbildung.

Werden alle von beliebigen Punkten des Raumes ausgehende homozentrische Strahlenbüschel durch ein System brechender Flächen in wieder homozentrische Büschel verwandelt, so spricht man von einer „punktweisen" Abbildung. Zwei Räume, die punktweise ineinander abgebildet werden, stehen in „kollinearer" Beziehung zueinander.

3. Brechung von Strahlenbüscheln an einer Kugelfläche. In Figur 1 sei M das Zentrum der die Medien n und n′ trennenden Kugelfläche RSE, auf welche der leuchtende Punkt L Strahlen sendet. Wir wollen zunächst wissen, ob sich alle Strahlen nach

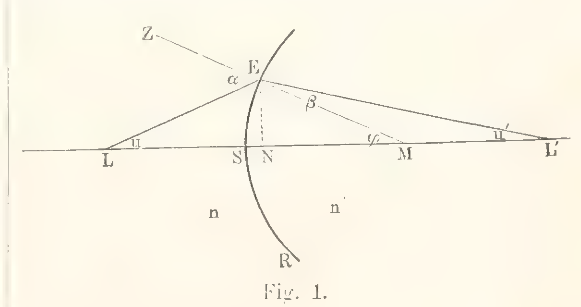


Fig. 1.

der Brechung wieder in einem Punkte schneiden. Von allen Einfallstrahlen gibt es nur einen einzigen, welcher nach dem Zentrum M der Kugelfläche zielt und daher ungebrochen durch letztere hindurchgeht. Es werde dieser Strahl als „Zentrale" bezeichnet und zur „Achse" der brechenden Kugelfläche genommen; der Schnittpunkt S beider heißt der „Scheitel" der Kugelfläche. Es ist klar, daß alle in einer die Achse LM enthaltenden Ebene (Achsenebene) verlaufenden Strahlen auch nach der Brechung darin verbleiben. Ferner folgt, daß der Strahlengang in jeder der möglichen Achsenebenen ganz derselbe ist; kennt man also den Verlauf der Austrittsgeraden in einer Achsenebene, so erhält man durch Rotation der Figur um die Zentrale als Achse den Verlauf aller Strahlen im Raume. Wir beschränken uns also auf die Betrachtung eines ebenen von L kommenden Strahlenbüschels. Es sei LE ein beliebiger Strahl dieses Büschels, der den Winkel u mit der

Zentralen LM bilde und das Einfallslot MEZ unter dem Winkel α schneide. In dieser Ebene LEM muß der zu LE gehörige gebrochene Strahl liegen; derselbe muß also die Achse LM, wenn sie nach beiden Seiten in das Unendliche verlängert gedacht wird, in irgendeinem Punkte L′ schneiden, dessen Entfernung vom Scheitel S wir zunächst bestimmen wollen.

Wird der zum Einfallswinkel α zugehörige Brechungswinkel mit β bezeichnet, so gilt für jeden beliebigen Strahl LE gemäß dem Brechungsgesetz:

$$n . \sin \alpha = n' \sin \beta;$$

bezeichnet man den Winkel, unter welchem der gebrochene Strahl EL′ die Achse schneidet mit u′, so gilt außerdem die Beziehung:

$$\frac{\sin u'}{\sin u} = \frac{LE}{L'E}$$

und ganz allgemein für jeden Strahl:

$$\frac{LM}{L'M} \cdot \frac{L'E}{LE} = \frac{n'}{n}$$

oder

$$L'M = LM . \frac{L'E}{LE} \cdot \frac{n}{n'} \quad . \; . \; . \; . \; . \; 1)$$

Da die Strecke LM für alle von L ausgehenden Strahlen konstant ist und ebenso der Quotient n′/n, so wäre Strecke L′M für alle Strahlen dieselbe d. h. es schnitten sich alle gebrochenen Strahlen in ein und demselben Punkte L′, falls für alle Divergenzwinkel u der Quotient L′E/LE ebenfalls konstant wäre. Wie die Figur lehrt, ist dies nicht der Fall, da das Verhältnis L′E/LE mit dem Orte von E längs SE variiert. Die Gesamtheit der auffallenden Strahlen bildet also eine Brennfläche (Diakaustik), deren Spitze dort liegt, wo der der Achse unendlich benachbarte Strahl LE nach der Brechung die Achse schneidet. Die Gestalt und Größe der Brennfläche interessiert uns hier nicht. Die allgemeine Erörterung der Diakaustik ist im Artikel „Lichtbrechung“ gegeben; die Besprechung der Brennfläche in unserem hier vorliegenden speziellen Falle die als „sphärische Aberration“ bezeichnet wird, gehört in die Lehre von der Erweiterung der Abbildungsgrenzen (vgl. den Artikel „Abbildungslehre“). Uns interessiert hier nur die Frage, ob und unter welchen Bedingungen ein beliebiger Objektpunkt L durch eine brechende Kugelfläche punktweise abgebildet wird. Und dies ist tatsächlich der Fall, wenn man sich auf die Mitwirkung enger Strahlenbüschel beschränkt. Wir wollen annehmen, daß die mitwirkenden Strahlen so kleine Divergenzwinkel u mit der Achse einschließen, daß man setzen darf:

$$\left.\begin{aligned} \sin u &= u \\ \text{und} \quad \cos u &= 1 \end{aligned}\right\} \quad . \; . \; . \; . \; . \; 2)$$

daß man also in den nach Potenzen des Winkels entwickelten goniometrischen Funktionen:

$$\sin u = u - \frac{u^3}{1.2.3} + \frac{u^5}{1.2.3.4.5} - \ldots$$

$$\cos u = 1 - \frac{u^2}{1.2} + \frac{u^4}{1.2.3.4} - \ldots$$

die zweiten und höheren Potenzen von u gegenüber u vernachlässigen darf. Nur in diesem ganz speziellen Falle wird das Verhältnis L′E/LE und somit auch die Schnittweite L′M aller gebrochenen Strahlen für alle innerhalb dieses unendlich engen Strahlenkegels verlaufenden Strahlen eine Konstante.

Denn bei der in 2) gemachten Annahme wird:

$$\frac{L'E}{LE} = \frac{\sin u}{\sin u'} = \frac{L'S}{LS} = \text{const.}$$

und somit auch:

$$L'M = LM . \frac{L'S}{LS} \cdot \frac{n}{n'} = \text{const.} \ldots 3)$$

Also nur bei der eingeführten Beschränkung werden homozentrische von Achsenpunkten L ausgehende Strahlenbüschel in homozentrische Strahlenbüschel verwandelt, deren Vereinigungspunkte wiederum auf der Achse gelegen sind und deren Entfernungen L′M vom Kugelmittelpunkt mit der Entfernung LM des Objektpunktes vom Kugelmittelpunkte variieren.

Strahlen, welche so kleine Winkel u mit der Achse bilden, daß cos u = 1 und sin u = u gesetzt werden darf, werden Nullstrahlen, Zentralstrahlen oder paraxiale Strahlen genannt, im Gegensatz zu den unter großem Divergenzwinkel u ausfahrenden Randstrahlen. Unser Resultat lautet also:

Homozentrische Nullstrahlen bleiben auch nach der Brechung an einer Kugelfläche homozentrisch.

Es existiert also in dem von uns definierten Sinne eine punktweise Abbildung aller auf der Achse gelegenen Objektpunkte, wenn lediglich deren Nullstrahlen zur Abbildung beitragen. Wir wollen diese Abbildung als Gaußsche Abbildung bezeichnen, weil sie von Gauß zuerst behandelt worden ist. Treffender können wir die Gaußsche Abbildung als eine solche „zweiter Ordnung“ bezeichnen, weil die bei ihr stattfindende Strahlenvereinigung von zweiter Ordnung d. h. unter Vernachlässigung der Glieder zweiter und höherer Ordnung erzielt ist. Berücksichtigt man bei der Abbildung so große Divergenzwinkel u, daß auch die Glieder dritter Ordnung ($\sin u = u - u^3/6$) mitwirken, so erhält man die Seidelsche Abbildung. Diese ist keine punktweise Abbildung; bei ihr läßt sich aber die Abweichung von der Gaußschen Abbildung in Gestalt von ganz

bestimmten Abbildungsfehlern angeben (vgl. den Artikel „Abbildungslehre").

Nach dem Gesetz der Reziprozität der Lichtwege ist es für den Verlauf der Strahlen gleichgültig, welche Richtung das Licht hat. Werden also die Nullstrahlen von L in L′ vereinigt, so werden umgekehrt auch die von L′ ausfahrenden Nullstrahlen in L vereinigt. Man nennt daher zwei so verbundene Punkte L und L′ auch „konjugierte" Vereinigungspunkte, wobei man es dahingestellt läßt, von welchem der beiden Punkte das Licht ausgeht. Das gleiche gilt von den sich entsprechenden Strahlen LE und L′E, welche man daher auch „konjugierte" Strahlen nennt. Ebenso bezeichnet man die einander zugeordneten homozentrischen Strahlenbüschel als „konjugierte" Strahlenbüschel.

4. Abbildungsgesetz für konjugierte Achsenpunkte. Statt der absoluten Werte LM, L′M usw. wollen wir zur Vereinfachung die Strecken mit Buchstaben bezeichnen und ihnen Vorzeichen beilegen, um die allgemeinen Abbildungsgesetze für die Brechung an jeder Kugelfläche zu erhalten. Wir bezeichnen den Abstand des Objektpunktes LM mit s, den Abstand des konjugierten Bildpunktes mit s′ und den Radius SM der brechenden Kugelfläche mit r. Außerdem setzen wir fest, daß die Strecken links vom Kugelscheitel S negativ, die Strecken rechts von S dagegen positiv seien und dementsprechend der Radius r positiv oder negativ genommen werde, je nachdem das Zentrum M rechts oder links von S liegt d. h. je nachdem die Strahlen auf die konvexe oder konkave Kugelfläche auffallen. Es gilt dann allgemein die Beziehung:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \quad \ldots\ldots\ldots 4)$$

Ergibt sich hieraus der Wert von s′ positiv oder negativ, so heißt das, der Bildpunkt L′ von L liegt rechts oder links vom Kugelscheitel S d. h. der Bildpunkt ist reell oder virtuell. Für jeden Wert von s gibt es nur einen Wert von s′; es findet also eine eindeutige Beziehung zwischen den Abständen konjugierter Achsenpunkte statt. Unsere Gleichung 4) lehrt ferner, daß L und L′ stets im gleichen Sinne wandern d. h. geht L von links nach rechts längs der Achse, so geht auch L′ von links nach rechts, ganz gleichgültig auf welcher Seite vom Scheitel S der Objektpunkt L liegt. Eine derartige Abbildung nennt man eine „rechtläufige". Sie kommt nur bei der Brechung vor; bei der Reflexion von Strahlenbüscheln an einer Kugelfläche ist es umgekehrt d. h. die Abbildung ist eine „rückläufige".

5. Abbildung leuchtender Objekte. In Wirklichkeit hat man es außer bei Fixsternen nicht mit leuchtenden Punkten sondern mit leuchtenden Objekten zu tun, die man sich aus nebeneinander liegenden Objektpunkten bestehend denken kann. Wir wollen erörtern, unter welchen Bedingungen die verschiedenen Punkte eines Objektes punktweise abgebildet werden.

Dazu betrachten wir zunächst außer dem Achsenpunkt L (Fig. 2) noch einen zweiten

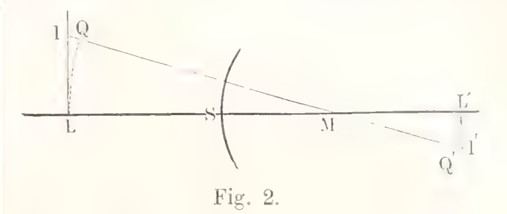


Fig. 2.

Objektpunkt Q seitlich von der Achse gelegen. Der von Q nach dem Kugelzentrum M ziehende Strahl geht ungebrochen durch die brechende Kugelfläche hindurch. Es ist also die Gerade QM der Zentralstrahl oder die Achse in bezug auf den Objektpunkt Q und spielt für die von Q ausgehenden Strahlen die gleiche Rolle wie die Gerade LM für den Punkt L.

Würden von Q also nur solche Strahlen auf die Kugelfläche auffallen, welche in bezug auf die Gerade QM die Rolle von Nullstrahlen spielen, so würden sich diese nach der Brechung alle in einem Punkte Q′ der Geraden QM schneiden. Auch müssen dann für die konjugierten Vereinigungspunkte Q und Q′ in bezug auf ihre Zentrale QMQ′ dieselben Gesetze gelten, wie für L und L′ in bezug auf deren Zentrale LML′. Ist also die Entfernung QM = LM, so muß auch Q′M = L′M sein.

Ohne weiteres kommt man zu diesem Resultat, wenn man die Achse LML′ um M als Drehpunkt rotieren läßt, bis sie mit der Geraden QMQ′ zusammenfällt. Wir erhalten somit das Resultat:

Liegen die Objektpunkte auf einer zur brechenden Fläche konzentrischen Kugelfläche LQ, so liegen die konjugierten Bildpunkte auf einer anderen, zur brechenden Fläche konzentrischen Kugelfläche L′Q′. Wo diese konzentrischen Flächen LQ oder L′Q′ von den durch M gelegten Geraden geschnitten werden, da liegen die zueinander konjugierten Bild- und Objektpunkte (L′ und L oder Q′ und Q) der konjugierten Kugelflächen.

Hierbei ist aber vorausgesetzt, daß von allen Objektpunkten L und Q nur Nullstrahlen oder Achsenstrahlen zur Wirksamkeit gelangen; dies ist nur dann der Fall, wenn Q unendlich nahe an P gelegen ist. Unter dieser Beschränkung kann dann aber auch statt des Kreisbogens LQ die zur

Achse LSM senkrechte Gerade lL gesetzt werden und wir erhalten den wichtigen Satz:

Senkrecht zur Achse gelegene Ebenen werden in wieder senkrecht zur Achse liegenden Ebenen abgebildet. Konjugierte Punkte zweier konjugierten Ebenen liegen auf einer durch den Kugelmittelpunkt gehenden Geraden.

Diese punktweise Abbildung gilt nur für Objektpunkte und Strahlen, die in einem zylindrischen, rings um die Achse gelegenen fadenförmigen Raume von so kleinem Querschnitt verlaufen, daß auch von außeraxialen Objektpunkten l nur Strahlen zur Wirkung gelangen, für welche $\sin u = u$ und $\cos u = 1$ gesetzt werden darf. Alle schiefen Strahlen und alle nicht unendlich nahe der Achse gelegenen Objektpunkte müssen ausgeschlossen werden.

Wir wollen den senkrechten Abstand lL eines Objektpunktes l von der Achse nach Art der Koordinaten mit y und den Abstand l′L′ des konjugierten Bildpunktes l′ von der Achse mit y′ bezeichnen. Dabei werde festgesetzt, daß die Abstände y und y′ positiv oder negativ zu nehmen sind, wenn sie oberhalb oder unterhalb der Achse gelegen sind. Es gilt dann:

$$\frac{y'}{y} = \frac{s' - r}{s - r} \quad \ldots\ldots\ 5)$$

wobei über die Vorzeichen von r, s und s′ die früheren Festsetzungen gelten. Auch diese Gleichung gilt für jede Lage des Objektes und für jede Kugelfläche gleichviel, ob deren konvexe oder konkave Oberfläche von den Strahlen getroffen wird.

Die beiden Gleichungen:

$$\left.\begin{aligned} &\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r} \\ \text{und}\quad &\frac{y'}{y} = \frac{s' - r}{s - r} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ 6)$$

bestimmen also den Abstand, die Lage und die Größe des Bildes, wenn der Radius r der Kugelfläche und die Brechungsquotienten n bezw. n′ der beiden durch die Kugelfläche getrennten Medien gegeben sind. Die drei Größen r, n und n′ heißen daher die Konstanten der brechenden Kugelfläche.

Aus der zweiten der Gleichungen 6) folgt, daß das Verhältnis y′/y nur von s und s′ abhängig ist. Man bezeichnet das Verhältnis y′/y als die Lateralvergrößerung, Linearvergrößerung oder als Vergrößerung schlechtweg. Demnach gilt:

Die Lateralvergrößerung ist in konjugierten Ebenenpaaren konstant, variiert jedoch von Ebenenpaar zu Ebenenpaar.

6. Brennebenen. Brennpunkte und Brennweiten. Wie oben erwähnt, gehört zu jedem Objektabstand s nur ein Bildabstand s′, welcher sich aus Gleichung 4 oder 6 berechnen läßt. Die Abbildung ist also im allgemeinen stetig. Da aber die Abbildung den ganzen Raum von Minus Unendlich bis Plus Unendlich umfassen soll, so wird es im Objektraume eine Ebene geben, welcher die unendlich ferne Ebene des Bildraumes entspricht, und ebenfalls muß im Bildraume eine Ebene existieren, zu welcher die unendlich ferne Ebene des Objektraumes konjugiert ist. Man bezeichnet diese Ebenen als Unstetigkeits- oder Brennebenen und ihre Durchschnittspunkte mit der Achse als Brennpunkte der Kugelfläche. Der dem Objektraume zukommende oder vordere Brennpunkt entspricht also dem unendlich fernen Achsenpunkte des Bildraumes d. h. die von ihm ausgehenden oder nach ihm hinzielenden Eintrittsgeraden werden so gebrochen, daß sie die Kugelfläche parallel zur Achse verlassen. Umgekehrt entsprechen parallel zur Achse verlaufenden Eintrittsgeraden im Bildraume Austrittsgeraden, welche sich im hinteren Brennpunkte wirklich oder rückwärts verlängert schneiden.

Wir wollen hinfort den vorderen Brennpunkt mit B (Fig. 3) und den hinteren Brennpunkt mit B′ bezeichnen. In Figur 3 ist der Fall gezeichnet, daß beide Brennpunkte reell sind, daß sich also die achsenparallelen Strahlen faktisch schneiden. Auch die Abstände der Brennpunkte vom Scheitel S führen besondere Namen und Bezeichnungen.

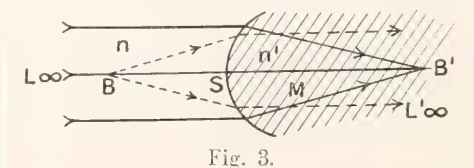


Fig. 3.

Es möge der Abstand BS des vorderen Brennpunkts vom Scheitel als Anfangspunkt mit F und der Abstand B′S mit F′ bezeichnet werden. Ihre Werte erhalten wir aus der ersten der Gleichungen 6) wenn wir in ihr $s = \infty$ und $s' = \infty$ setzen. Es ergibt sich so:

$$\left.\begin{aligned} B'S &= F' = \frac{n'r}{n' - n} \\ BS &= F = -\frac{nr}{n' - n} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ 7)$$

$$\text{woraus folgt:}\quad \frac{F'}{F} = -\frac{n'}{n} \quad \ldots\ldots\ 8$$

d. h. in Worten: Die Brennpunkte liegen stets auf entgegengesetzten Seiten der brechenden Fläche; ihre Abstände verhalten sich wie die Brechungsquotienten der zugehörigen Medien.

Je nachdem das Vorzeichen von F′ positiv oder negativ ist, schneiden sich die Austrittsgeraden wirklich oder nur rückwärts verlängert; entsprechend verlaufen die Austrittsgeraden konvergent oder divergent und man nennt demgemäß die brechende Fläche kollektiv oder dispansiv. Die Gleichungen 7) lassen erkennen, daß F′ nur dann größer als Null wird, wenn r und n′—n gleiches Vorzeichen haben. Eine brechende Fläche wirkt also kollektiv oder sammelt parallele Eintrittsgeraden in einem Punkte, wenn ihr Mittelpunkt im stärker brechenden Medium liegt, gleichviel ob das Licht auf die konvexe oder konkave Kugelfläche auffällt.

Gewöhnlich nennt man die Abstände F und F′ der Brennpunkte B und B′ vom Kugelscheitel die „Brennweiten" der Kugelfläche. Auch wir wollen uns dieser Ausdrücke bedienen; rechnet man die Brennweiten nicht vom Kugelscheitel aus, sondern umgekehrt als Entfernungen des Kugelscheitels von den Brennpunkten, so erhalten F und F′ das entgegengesetzte Vorzeichen.

Wir werden im nächsten Abschnitt eine allgemeinere Definition für die „Brennweite" eines brechenden Systems erhalten. Nach dieser Definition ist die Brennweite der Quotient zweier Größen, welcher speziell bei einer Kugelfläche gleich ist dem negativ genommenen Abstande des Brennpunktes vom Scheitel. Wo man in späteren Paragraphen auf die hier erhaltenen Werte der Brennweiten F und F′ zurückgreift, müssen dieselben also mit entgegengesetztem Vorzeichen benutzt werden.

Mit Hilfe der Brennweiten F und F′ nimmt die erste der Abbildungsgleichungen 6) folgende einfache Gestalt an:

$$\frac{F'}{s'} + \frac{F}{s} = 1 \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 9)$$

Ist die brechende Kugelfläche dispansiv, so liegt umgekehrt wie in Figur 3 der vordere Brennpunkt B im hinteren Medium und der hintere Brennpunkt B′ im vorderen Medium.

7. Lagrangesche Beziehung zwischen der Lateralvergrößerung und der Winkelvergrößerung. In Figur 4 seien Ll und L′l′ konjugierte Bilder, LE und L′E′ ein beliebiges Paar konjugierter Strahlen, welche die spitzen Winkel u und u′ mit der Achse LML′ einschließen mögen. In bezug auf die Vorzeichen von u und u′ werde festgesetzt, daß sie positiv oder negativ zu nehmen sind, wenn man den Strahl oder dessen Verlängerung im Sinne oder im entgegengesetzten Sinne des Uhrzeigers drehen muß, um den Strahl den Winkel durchlaufend mit der Achse zur Koinzidenz zu bringen. Also ist in der Figur 4 Winkel u positiv und Winkel u′ negativ zu rechnen. Ist wieder LS = s und L′S = s′, so gilt:

$$\frac{tgu'}{tgu} = \frac{s}{s'} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 10)$$

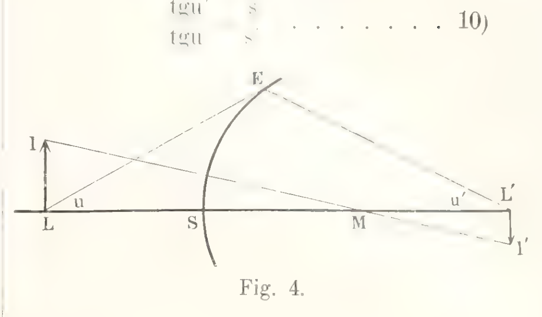


Fig. 4.

Man nennt den Quotienten tgu′/tgu das Tangentenverhältnis, Angularvergrößerung oder Winkelvergrößerung. Unter Benutzung der ersten Gleichung 6) erhalten wir die Beziehung:

$$\frac{y'}{y} \cdot \frac{tgu'}{tgu} = \frac{n}{n'} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 11)$$

wenn wieder n oder n′ die Brechungsquotienten des Objekt- oder des Bildmediums bedeuten. In Worten sagt diese Gleichung aus: Bei der Brechung an einer Kugelfläche bleibt das Produkt aus der Lateralvergrößerung und der Winkelvergrößerung konstant und zwar gleich dem Verhältnis der Brechungsquotienten des vorderen und hinteren Mediums.

Bei der Kleinheit der allein zulässigen Winkel u und u′ kann man tgu = u und tgu′ = u′ setzen, so daß unsere Beziehung 11) auch geschrieben werden kann:

$$y'.n'.u' = y.n.u \qquad 12)$$

welche aussagt: Bei der Brechung an einer Kugelfläche bleibt das Produkt aus der Bildgröße, dem Brechungsquotient und dem Divergenzwinkel (Achsenwinkel) konstant.

Man bezeichnet dieses Gesetz nach seinem Urheber als das Lagrangesche Gesetz.

8. Existenz einer Abbildung durch ein zentriertes System brechender Kugelflächen. Unter einem zentrierten optischen System versteht man eine Anzahl brechender Kugelflächen, deren Mittelpunkte alle in einer geraden Linie, der optischen Achse des Systems, liegen. Die brechende Fläche, auf welche das von links kommende Licht fällt, ist die erste; das Medium, welches links von der ersten brechenden Fläche, d. h. vor derselben liegt, heißt das erste oder vordere Medium; das zwischen der ersten und zweiten Kugelfläche gelegene heißt das zweite usw., das rechts von der letzten Fläche, d. h. hinter derselben gelegene das letzte oder hintere Medium. Zu einer Anzahl m brechender Flächen gehören also stets m + 1

brechende Medien. Es werde mit n der Brechungsindex des vorderen, mit n' derjenige des hinteren Mediums bezeichnet, während n_2, n_3 usw. die Brechungsquotienten des zweiten, dritten usw. Mediums seien. Zu jedem Medium werde der reelle oder virtuelle Vereinigungspunkt desjenigen Strahlenbüschels gehörig angenommen, welches faktisch in dem betreffenden Medium verläuft, gleichviel wo der Vereinigungspunkt liegen mag.

Wir wollen zunächst zeigen, daß homozentrische, von leuchtenden Punkten im vorderen Medium ausgehende Strahlen auch nach dem Durchgange durch ein zentriertes System brechender Kugelflächen homozentrisch sind. Vorausgesetzt werde nur, daß auch hier wie bei einer brechenden Kugelfläche alle Winkel so klein seien, daß statt der Sinus und Tangenten die Bögen selbst gesetzt werden dürfen d. h., daß nur Nullstrahlen zur Abbildung beitragen.

In Figur 5 werde zunächst ein auf der Achse liegender leuchtender Punkt L angenommen. Wie wir wissen, werden die von ihm ausgehenden Lichtstrahlen nach der Brechung an einer brechenden Fläche wieder in einem Achsenpunkte vereinigt. Die erste Fläche (Nr. 1) des Systems wird also von L einen Bildpunkt L_2 erzeugen, welcher auf der Systemachse gelegen ist; derselbe sei reell und liege im Medium zwischen der ersten und zweiten brechenden Fläche des Systems. Dieser Bildpunkt L_2 kann als Objektpunkt für die zweite brechende Fläche aufgefaßt werden; von ihm entwirft letztere wieder einen Bildpunkt L_3 ebenfalls auf der Systemachse; auch L_3 sei reell. So geht es von Fläche zu Fläche. Von L_3 entwerfe die Fläche 3 einen virtuellen Achsenpunkt L_4; da die im Medium n_4 verlaufenden Strahlen von L_4 zu kommen scheinen, so ist letzterer Punkt gleichsam selbstleuchtender Punkt für die folgende Fläche (Nr. 4), welche von ihm wieder einen Achsenpunkt L' erzeugt.

Es bleiben also homozentrische, von einem Punkte der Achse kommende Büschel auch nach dem Durchgange durch beliebig viele brechende Flächen homozentrisch.

Dies gilt aber nicht nur für die in der Zeichnungsebene verlaufenden Strahlen, sondern wie schon aus der Rotation der Figur 5 um die gemeinsame Achse ersichtlich ist, für alle im Raume von L ausfahrenden Nullstrahlen.

Liegt der leuchtende Punkt nicht auf der gemeinsamen Achse des Systems, sondern außerhalb derselben, z. B. in l (Fig. 6), so ist zunächst klar, daß alle von ihm ausgehenden Strahlen nach dem Durchgange an der ersten brechenden Fläche in einem Punkte l_2 der Zentralen lM_1 zusammentreffen, welche den Punkt l mit dem Mittelpunkte M_1 der ersten Fläche verbindet.

Es werde betont, daß dies ebenfalls für das ganze räumliche Strahlenbündel gilt, welches l aussendet. Liegt l senkrecht über L, so liegt l_2 senkrecht über oder unter L_2; in unserem speziellen Falle (Fig. 6) liegt l_2 unter L_2. Das von l_2 ausgehende Strahlenbüschel hat keinen durch das Zentrum M_2 der zweiten Kugelfläche gehenden Hauptstrahl l_2M_2. Man darf es aber auffassen als Teil eines größeren Büschels, dessen Hauptstrahl die Zentrale l_2M_2 bildet, wie es ein selbstleuchtender Punkt l_2 aussenden würde. Von diesem wissen wir, daß es seinen Vereinigungspunkt auf der Zentralen l_2M_2 in l_3 hat, wobei l_3L_3 senkrecht zu M_1M_2 steht. Demnach muß auch das Teilstrahlenbüschel, welches von dem durch Fläche 1 entworfenen Bildpunkte l_2 kommt und in der Figur schraffiert ist, seinen Vereinigungspunkt in l_3 haben;

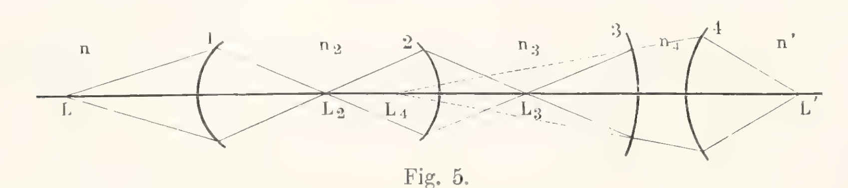


Fig. 5.

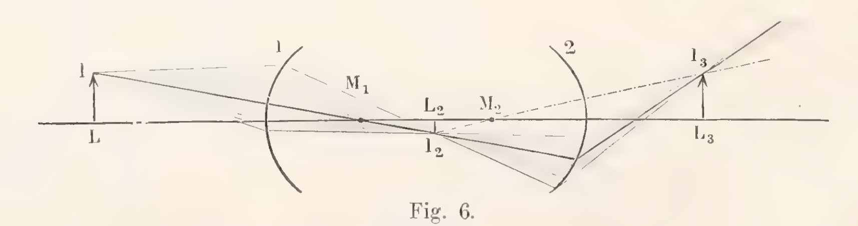


Fig. 6.

es bleibt also das von einem außeraxialen Punkte l_2 herrührende körperliche Strahlenbüschel auch nach der zweiten Brechung homozentrisch. Dies gilt von jeder folgenden Brechung, so daß hiermit ganz allgemein bewiesen ist, daß homozentrische Strahlen nach dem Durchgange durch ein zentriertes optisches System im letzten Medium homozentrisch verlaufen, auch wenn der Objektpunkt seitlich von der Achse liegt. Es besteht also auch eine punktweise Abbildung der beiden durch das System getrennten Räume, wenn man sich auf Nullstrahlen beschränkt (Gaußsche Abbildung).

Es werde der Raum vor dem System wieder als vorderer oder Objektraum, der Raum hinter dem System als hinterer oder Bildraum bezeichnet.

Aus der Figur 6 erkennen wir, daß auch für das ganze System der für eine Kugelfläche abgeleitete Satz gilt:

Senkrecht zur Systemachse gelegene Ebenen des Objektraumes werden in wieder senkrechten Ebenen abgebildet.

Es werde die im Objektraum gelegene Ebene lL als die „Objektebene", die zu ihr konjugierte Ebene als „Bildebene" bezeichnet. Die Strahlenbüschel, welche sich in Punkten der Bildebene reell oder rückwärts verlängert schneiden, verlaufen stets im Bildraume, während die Bildebene selbst ihren Ort im Objektraume haben kann. Sie gehört gleichwohl dem Bildraume an, weil die den Bildpunkt L′ bildenden Büschel eben im Bildraume verlaufen.

Wenden wir den im Abschnitt 5 bewiesenen Satz von Fläche zu Fläche an, so erhalten wir die analoge wichtige Regel:

In jedem Paar konjugierter Ebenen senkrecht zur Systemachse ist die Lateral- und die Angularvergrößerung konstant.

Auch gilt die für eine brechende Fläche von Lagrange aufgestellte Beziehung (Abschnitt 7) für ein zentriertes System brechender Kugelflächen:

$$\left.\begin{aligned} \frac{y'}{y}\cdot\frac{\operatorname{tg}u'}{\operatorname{tg}u} &= \frac{n}{n'} \\ \text{oder}\qquad y'.n'.u' &= y.n.u \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots 13)$$

wenn die ungestrichenen Buchstaben sich auf das Objektmedium, die gestrichenen auf das Bildmedium beziehen. Da diese Beziehung für ein System von Helmholtz hergeleitet wurde, wollen wir sie als die Lagrange-Helmholtzsche bezeichnen.

9. Abbildung eines beliebigen Punktes oder Objektes nach E. Abbe. Mittels der bisher für ein System aufgestellten Gesetze gelingt es nach dem Vorgange von Abbe leicht, alle Beziehungen abzuleiten, welche zwischen konjugierten Punkten oder Querschnitten in den durch ein System getrennten Räumen stattfinden müssen, ohne speziell die Lage und die näheren Eigenschaften der einzelnen Kugelflächen oder das Gesetz der

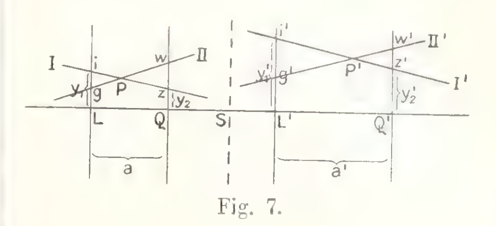


Fig. 7.

Brechung oder der Spiegelung zu kennen. Es werde hinfort nur vorausgesetzt, daß sich das Licht längs gerader Linien fortpflanze und daß nur Nullstrahlen zur Mitwirkung gelangen. Zunächst findet man ohne weiteres zu jedem Objektpunkt P (Fig. 7) im vorderen Medium seinen konjugierten Bildpunkt P′ im hinteren Medium, wenn in bezug auf das abbildende zentrierte System S gegeben sind: Lage und gegenseitiger Abstand a zweier Objektebenen L und Q im Objektraume, Lage und gegenseitiger Abstand der zu L und Q konjugierten Bildebenen L′ und Q′ im Bildraume, die Lateral- oder Linearvergrößerung $v_1 = y_1'/y_1$ in dem konjugierten Ebenenpaar L und L′ und die Lateralvergrößerung $v_2 = y_2'/y_2$ im konjugierten Ebenenpaar Q und Q′.

Es schneide z. B. der beliebige Strahl I die Objektebenen in den Punkten i und z. Mittels der Werte v_1 und v_2 findet man dann die zu i und z konjugierten Punkte i′ und z′ und somit den zu I konjugierten Strahl I′ als Verbindungslinie von i′ und z′. Schneidet ein zweiter Strahl II die Objektebenen in g und w, so erhält man wieder mittels v_1 und v_2 die konjugierten Punkte g′ und w′ und somit Strahl II′. Der zum Schnittpunkt P der beiden Eintrittsstrahlen I und II gehörige konjugierte Punkt muß sowohl auf dem Strahle I′ wie auf II′ liegen d. h. der Schnittpunkt P′ der beiden Austrittsstrahlen I′ und II′ ist der zu P konjugierte Punkt. Da aber jeder Punkt des Objektraumes als Schnittpunkt zweier die Querschnitte L und Q schneidenden Strahlen aufgefaßt werden kann, so kann man zu jedem Objektpunkte seinen Bildpunkt finden. Es ist also die ganze Abbildung bestimmt, wenn sie in zwei Paaren konjugierter Querschnitte gegeben ist, deren Lage bekannt ist.

10. Brennpunkte und Brennweiten des zentrierten Systems. Statt durch die beliebig gerichteten Strahlen I und II wollen wir den zum Objekt P konjugierten Bildpunkt aufsuchen mittels zweier ganz be-

stimmter Strahlen I und II (Fig. 8) und zwar laufe Strahl I parallel zur Achse im Objektraum, während der Strahl II so gerichtet sei, daß sein konjugierter Strahl II′ im Bildraum zur Achse parallel

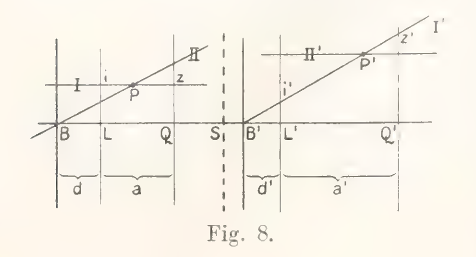


Fig. 8.

verlaufe. Zunächst suchen wir die Lage des Schnittpunktes B′ der Achse mit dem Strahl I′, welcher zum achsenparallel einfallenden Strahl I konjugiert ist. Letzterer schneidet die Objektebenen P und Q in gleicher Höhe; es ist also

$$iL = zQ = y_1;$$

also:

$$i'L' = y_1' = v_1 y_1$$
$$z'Q' = y_2' = v_2 y_1$$

d. h.

$$\left.\begin{aligned} v_1 &= \frac{y_1'}{y_1} \\ v_2 &= \frac{y_2'}{y_2} \end{aligned}\right| \frac{y_2'}{y_1'} = \frac{v_2}{v_1} \quad \ldots\ldots \quad 14)$$

Mit Uebergehung der Herleitung erhält man dann für die Strecke $B'L' = d'$ den einfachen Ausdruck:

$$d' = a' \frac{v_1}{v_2 - v_1} \quad \ldots\ldots \quad 15)$$

oder in Worten: Die Schnittweite d′ des zum achsenparallelen Strahl I konjugierten Strahles I′ ist unabhängig von der Höhe y_1, in welcher Strahl I über der Achse verläuft d. h. alle achsenparallel einfallenden Strahlen schneiden sich in einem Punkte B′ des Bildraums. Es ist also Punkt B′ der zum unendlich fernen Objektpunkte konjugierte Bildpunkt oder der hintere Brennpunkt des zentrierten Systems.

Es sollte Strahl II konjugiert sein dem achsenparallelen Strahl II′ im Bildraume. Eine analoge Betrachtung wie vorher ergibt für den Abstand d des Schnittpunktes B der Achse mit dem Strahle II von der Objektebene L die Beziehung:

$$d = -a \frac{v_2}{v_2 - v_1}$$

oder in Worten: Die Schnittweite d des zum achsenparallelen Strahl II′ konjugierten Strahles II ist unabhängig von der Höhe y_2, in welcher Strahl II′ über der Achse verläuft. Alle vom Schnittpunkte B ausgehenden Strahlen verlassen also das System parallel zur Achse. Es ist also Punkt B der vordere Brennpunkt, konjugiert zum unendlich fernen Punkte im Bildraume. Damit ist die Existenz von Brennpunkten erwiesen und zugleich deren Lage bestimmt.

Bei einer brechenden Kugelfläche erwies es sich als praktisch, die Abstände der Brennpunkte vom Kugelscheitel als Brennweiten der brechenden Fläche zu definieren. Beim zentrierten System erhalten wir eine andere Definition der Brennweiten des Systems, deren Bedeutung erst später herausspringen wird und das Wesen der „Brennebenen“ ins rechte Licht setzt.

Wir wissen, daß ein achsenparalleler Strahl I im Objektmedium durch den Brennpunkt B′ im Bildmedium geht. Bilden wir das Verhältnis der Einfallshöhe y_1 des achsenparallelen Strahls I zur Tangente desjenigen Winkels u′, den sein konjugierter Strahl I′ im Bildmedium mit der Systemachse bildet, so erhalten wir gemäß Figur 8 die Beziehung:

$$\frac{y_1}{\operatorname{tg} u'} = \frac{a'}{v_2 - v_1} = \text{constans} = F' \quad . \quad 16)$$

d. h. es ist der Wert des Verhältnisses $y_1/\operatorname{tg} u'$ unabhängig von der Einfallshöhe y_1 des achsenparallelen Objektstrahles I und lediglich abhängig von den Konstanten a′, v_1 und v_2 des abbildenden Systems. Die Konstante $F' = \frac{a'}{v_2 - v_1}$ heißt die „hintere Brennweite“ des Systems.

Analog erhält man die Beziehung:

$$\frac{y_2'}{\operatorname{tg} u} = a \frac{v_2 v_1}{v_1 - v_2} = \text{constans} = F \quad . \; . \quad 17)$$

d. h. es ist auch der Wert des Verhältnisses $y_2'/\operatorname{tg} u$ nur von den Konstanten des Systems abhängig. Man bezeichnet die Konstante $F = a \frac{v_2 v_1}{v_1 - v_2}$ als die vordere Brennweite des Systems. Die so definierten Brennweiten sind also aus den Konstanten des zentrierten Systems zu berechnen.

Die durch die Brennpunkte zur Achse senkrecht gelegten Ebenen werden als Brennebenen bezeichnet. Die vordere Brennebene ist zur unendlich fernen Ebene des Bildraums, die hintere Brennebene ist zur unendlich fernen Ebene des Objektraums konjugiert. Die Brennebenen werden daher auch „Unstetigkeitsebenen“ genannt.

Um die Eigenschaften der Brennebenen kennen zu lernen, bilden wir in Figur 9 einen beliebigen Strahl III ab, welcher die vordere

Brennebene B im Punkte b und die Achse unter dem Winkel u schneiden möge.

Es sei III' der zum Strahl III konjugierte Strahl. Bezeichnen wir die Schnitthöhen Bb und B'b', in denen die konjugierten

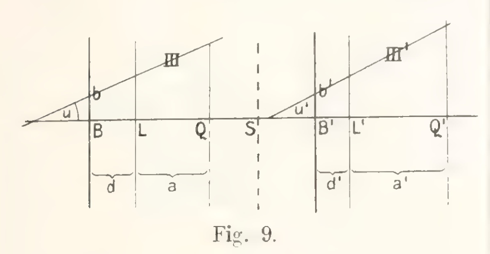


Fig. 9.

Strahlen III und III' die vordere und hintere Brennebene B und B' schneiden, mit h und h', so erhalten wir folgende Beziehungen:

$$\left.\begin{aligned} \frac{h'}{\mathrm{tgu}} &= a\,\frac{v_1\,v_2}{v_1 - v_2} \\ \text{und}\quad \frac{h}{\mathrm{tgu'}} &= \frac{a'}{v_2 - v_1} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots 18)$$

Diese Gleichungen lehren, daß in jedem optischen System das Verhältnis der Schnitthöhe eines beliebigen Strahles in der Brennebene des Bildraumes (oder Objektraumes) zu der Tangente seines Neigungswinkels im Objektraume (oder Bildraume) gegen die Achse eine Konstante ist.

Die Ausdrücke auf der rechten Seite der Gleichung 18 sind identisch mit denjenigen für die Brennweiten F und F' (Glchgn. 16 und 17), so daß wir erhalten:

$$\frac{h'}{\mathrm{tgu}} = F \text{ und } \frac{h}{\mathrm{tgu'}} = F' \quad \ldots 19)$$

durch welche Gleichungen wir für die Brennweiten eine allgemeinere Bedeutung gewonnen haben. Sie lehren nämlich, daß alle unter dem gleichen Winkel u einfallenden Strahlen (paralleler Strahlenzylinder unter dem Winkel u gegen die Achse geneigt) die hintere Brennebene in einem einzigen Punkte (b') schneiden und daß alle von einem Punkte (b) der vorderen Brennebene divergierenden Strahlen das System einander parallel als Strahlenzylinder in einer Richtung verlassen, welche den Winkel u' mit der Achse einschließt. Die Brennebenen sind also durch folgende Eigenschaft ausgezeichnet: Alle parallel einfallenden Strahlenzylinder vereinigen sich reell oder virtuell in je einem Punkte der hinteren Brennebene. Alle von Punkten der vorderen Brennebene ausfahrenden Strahlenbüschel verlassen das zentrierte System als Strahlenzylinder mit verschiedener Neigung gegen die Systemachse.

11. Geometrische Deutung der Brennweiten nach Gauß. Wir wollen annehmen das Objekt L_∞ in Figur 10 sei unendlich weit vom Kollektivsystem S entfernt. Die von jedem Objektpunkt kommenden Strahlen-

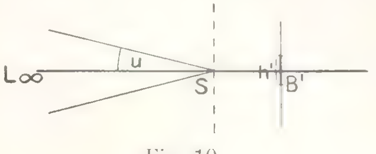


Fig. 10.

büschel sind also faktisch als Strahlenzylinder anzusehen und werden daher in Punkten der hinteren Brennebene vereinigt, welche senkrecht zur Systemachse durch den hinteren Brennpunkt B' geht. Die Sonne können wir als unendlich entfernt betrachten. Es entsteht von ihr somit in der hinteren Brennebene ein reelles Sonnenbildchen, dessen Mitte mit dem hinteren Brennpunkt B' koinzidiere. Ist der Winkel, den die vom Sonnenrand kommenden parallelen Strahlen mit der Systemachse einschließen, gleich u, so ist der Durchmesser h' des Sonnenbildchens gegeben durch die Beziehung:

$$h' = F.\mathrm{tgu}$$

wo F die vordere Brennweite des Systems ist. Bei der Kleinheit der erlaubten Divergenzwinkel u können wir schreiben:

$$2h' = 2F.\mathrm{tgu} = F.\mathrm{tg2u}$$

oder

$$F = \frac{2h'}{\mathrm{tg2u}} \quad \ldots\ldots 20)$$

wo 2 u der „Sehwinkel" ist, unter welchem die Sonne vom Ort des Systems aus erscheint d. h. ihre „scheinbaren Größe" ist. Die vordere Brennweite F ist also folgendermaßen geometrisch zu deuten:

Die vordere Brennweite (F) ist das Verhältnis der Bildgröße (2h') eines unendlich entfernten Objektes zur Tangente des Sehwinkels (tg2u), unter welchem das unendlich entfernte Objekt vom Orte des Systems aus erscheint.

Analog ist die hintere Brennweite (F') das Verhältnis eines Objektes in der vorderen Brennebene zur Tangente des Sehwinkels, unter welchem sein im Unendlichen befindlichen Bildes vom System aus erscheint. Unsere Definition der Brennweiten lehrt also, daß der Name Brennweite nicht exakt ist, insofern die Brennweiten sich nicht als Strecken darstellen. Wir wollen gleichwohl die Bezeichnung beibehalten, da die so definierten Brennweiten bei einer einzigen brechenden Fläche mit den Strecken identisch werden, die wir dort als Brennweiten bezeichnet haben (§ 6).

12. Abbesche Form der Abbildungsgesetze. Es seien wieder die Konstanten des Systems S (Fig. 7 S. 367) gegeben, also die Lage zweier konjugierten Ebenenpaare L und L' oder Q und Q' und die in ihnen stattfindenden Lateralvergrößerungen v_1 und v_2, wodurch zugleich die Abstände des vorderen und hinteren Brennpunkts

$$d = -a \frac{v_2}{v_2 - v_1} \text{ und } d' = a' \frac{v_1}{v_2 - v_1}$$

vom Ebenenpaar L, L' gegeben sind. Es werde aber die Lage von P jetzt durch seine Koordinaten x und y in bezug auf B als Koordinatenanfang und die Lage des konjugierten Punktes P' durch seine Koordinaten x' und y' in bezug auf B' als Koordinatenanfang bestimmt. Dabei sollen die Strecken x und x' positiv gerechnet werden, wenn sie im Sinne der Lichtfortpflanzung von B und B' aus verlaufen, negativ im umgekehrten Sinne. Die Strecken y und y' seien wieder positiv oder negativ, wenn sie oberhalb oder unterhalb der Achse gelegen sind. Es gilt dann ganz allgemein:

$$\left.\begin{aligned} xx' &= F.F' \\ \frac{y'}{y} &= \frac{F}{x} = \frac{x'}{F'} \end{aligned}\right\} \quad \ldots . \quad 21)$$

Diese Abbeschen Abbildungsgleichungen sind zugleich diejenigen von allgemeinster Form und stellen alle möglichen Abbildungsverhältnisse dar, welche bei einem zentrierten spiegelnden oder brechenden System von Kugelflächen auftreten können. Ist die Lage der Brennpunkte und sind die Brennweiten ihrer Größe und ihrem Vorzeichen nach gegeben, so erlauben die Gleichungen 21) aus den Koordinaten x, y eines beliebigen Objektpunktes P in bezug auf den vorderen Brennpunkt, die Koordinaten x', y' des konjugierten Bildpunktes P' inbezug auf den hinteren Brennpunkt zu berechnen.

Je nach den Vorzeichen von F und F' müssen wir vier verschiedene Arten der Abbildung unterscheiden. Um diese kennen zu lernen, setzen wir für unsere jetzige Betrachtung: F. F' = k gleich einer Konstanten, da ja nicht die Größe von F und F', sondern nur deren Vorzeichen die Art der Abbildung bedingen.

Dann nehmen die Abbeschen Abbildungs gleichungen folgende Form an:

$$\left.\begin{aligned} xx' &= K \\ \frac{y'}{y} &= \frac{F}{x} \end{aligned}\right\} \quad \ldots \ldots \quad 22)$$

Darin kann k positiv oder negativ werden und für jede dieser Möglichkeiten kann wieder F positiv oder negativ sein. Es existieren somit vier Abbildungsarten. Eine hier nicht durchgeführte Diskussion ergibt für diese vier Fälle:

k positiv: Objekt und Bild liegen stets auf gleichen Seiten der zugehörigen Brennpunkte; beide wandern in entgegengesetzter Richtung d. h. geht das Objekt von links nach rechts, so das Bild von rechts nach links (Rückläufige" Abbildung, welche bei der Spiegelung an Kugelflächen auftritt).

k negativ: Objekt und Bild liegen stets auf verschiedenen Seiten der zugehörigen Brennpunkte und wandern in gleicher Richtung (Rechtläufige Abbildung, welche bei der Brechung an Kugelflächen auftritt).

Beide Hauptarten zerfallen in je zwei gleiche Unterabteilungen, je nachdem die vordere Brennweite positiv oder negativ ist.

F positiv: Einem Objekt rechts vom vorderen Brennpunkt entspricht ein aufrechtes Bild, einem Objekt links ein umgekehrtes. Dies tritt ein bei der Spiegelung an Konkavspiegeln bezw. Hohlspiegeln und bei der Brechung an ideellen Sammellinsen. Diese Systeme vereinigen parallele Strahlenzylinder reell und heißen daher Kollektivsysteme.

F negativ: Einem Objekt rechts vom vorderen Brennpunkte entspricht ein umgekehrtes Bild, einem Objekt links ein aufrechtes Bild. Dies tritt ein bei der Spiegelung an Konvexspiegeln und bei der Brechung an ideellen Zerstreuungslinsen. Diese Systeme vereinigen parallele Strahlenzylinder in einem virtuellen Punkt d. h. sie zerstreuen parallele Strahlen so, daß sie sich erst rückwärts verlängert schneiden. Sie heißen daher Dispansivsysteme.

13. Allen zentrierten Systemen zukommende Eigenschaften. Unter Benutzung der Lagrange-Helmholtzschen Beziehung (Abschnitt 8) und der zweiten unserer Abbildungsgleichungen 22) erhält man die allen Systemen gemeinsame Beziehung:

$$\frac{n'}{n} = -\frac{F'}{F} \quad \ldots \ldots \ldots \quad 23)$$

d. h. in jedem zentrierten System verhalten sich die Brennweiten wie die Brechungsquotienten der durch sie getrennten Medien; ihre Vorzeichen haben entgegengesetztes Vorzeichen.

Sind die Brechungsquotienten des vorderen und hinteren Mediums einander gleich (n = n') so haben beide Brennweiten gleiche Größe. Dies ist der Fall bei Linsensystemen in Luft.

Ferner gilt für alle Systeme der Satz: Die Axialvergrößerung ist an allen konjugierten Punktepaaren proportional dem Quadrat der Lateralvergrößerung. Dabei ist unter Lateralvergrößerung das Verhältnis y'/y konjugierter Bilder und unter Axialvergrößerung das Verhältnis a'/a der axialen

Abstände a und a′ (Fig. 7) zweier konjugierter Ebenenpaare L, L′ und Q, Q′ voneinander zu verstehen.

14. Hauptebenen. Hauptpunkte. Knotenebenen und Knotenpunkte. Nach Gauß bezeichnet man dasjenige Ebenenpaar als die positiven Hauptebenen des Systems, in welchem Objekt und Bild gleich groß und gleich gerichtet sind; die Schnittpunkte der positiven Hauptebenen mit der Achse werden positive Hauptpunkte genannt.

Negative Hauptebenen sind nach Töpler solche konjugierten Ebenen, in denen Bild und Objekt gleich groß, aber entgegengesetzt gerichtet sind; die Schnittpunkte dieser negativen Hauptebenen mit der Achse heißen die „negativen“ Hauptpunkte.

Laut Definition gilt für die positiven Hauptebenen:

$$y'/y = +1$$

und für die negativen Hauptebenen:

$$y'/y = -1.$$

Die Abstände der positiven Hauptpunkte H und H′ (Fig. 11) von den zugehörigen Brennpunkten B und B′ sind gegeben durch die Beziehungen: HB = F und H′B′ = F′, da $y'/y = +1$ nur für $x = F$ und $x' = F'$ wird. Ist also, wie in Figur 11, F positiv und F′ negativ, so liegt H rechts von B um die Brennweite F entfernt und H′ links von B′ um die Brennweite F′ entfernt.

Durch Einführung der Gaußschen Hauptpunkte sind also die Brennweiten wieder auf Strecken zurückgeführt: Es ist die vordere Brennweite gleich dem Abstande des vorderen Hauptpunktes H vom vorderen Brennpunkte B; die hintere Brennweite ist gleich dem Abstande des hinteren Hauptpunktes H′ vom hinteren Brennpunkte B′. Da wir jetzt die Strecken von den Brennpunkten aus rechnen und sie positiv zählen,

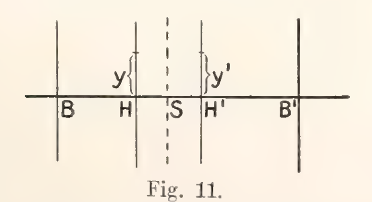


Fig. 11.

wenn sie im Sinne der Leichtfortpflanzung liegen, so ist bei dem in Figur 11 gewählten Beispiel F = HB positiv und F′ = H′B′ negativ zu setzen.

Knotenpunkte. Außer den Brenn- und Hauptpunkten gibt es noch ein Paar ausgezeichneter Punkte, die „Knotenpunkte“. Einem zum vorderen Knotenpunkt K (Fig. 12) zielenden Strahl lK ist konjugiert der parallel aus dem hinteren Knotenpunkte K′ gezogene Strahl K′l′. Konjugierte zu den Knotenpunkten gehörige Strahlen bilden also mit der Achse gleichgroße Winkel (u = u′). Je nachdem die

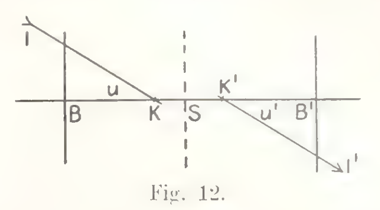


Fig. 12.

konjugierten Knotenpunkte auf gleichen oder verschiedenen Seiten der Achse gelegen sind, nennt man die Knotenpunkte positiv oder negativ. Für die von Listing eingeführten positiven Knotenpunkte (Fig. 12) gilt also:

$$\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = +1$$

während für die von Töpler eingeführten negativen Knotenpunkte gilt:

$$\frac{\operatorname{tg} u'}{\operatorname{tg} u} = -1$$

Letztere sind von geringerer Bedeutung. Dagegen spielen die positiven Knotenpunkte eine große Rolle für die Konstruktion der Bilder. Ihre Abstände von den Brennpunkten sind gleich den Brennweiten des Systems und zwar gilt für die positiven Knotenpunkte:

$$KB = -F' \text{ und } K'B' = -F$$

Ist also wie in Figur 12 F positiv und F′ negativ, so liegt K rechts von B und K′ links von B′. Die durch die Knotenpunkte zur Achse senkrecht gelegten Ebenen heißen die „Knotenebenen“.

Für die folgenden Betrachtungen sind alle diese Kardinalpunkte von großer Wichtigkeit. Wenn im folgenden schlechtweg von den Hauptebenen, Hauptpunkten, Knotenebenen und Knotenpunkten gesprochen wird, so seien darunter stets die positiven Hauptebenen usw. verstanden. Sehen wir also ab von den negativen Kardinalpunkten, so bleiben nur dreierlei Kardinalpunkte übrig, welche ein System haben kann:

1. Die Brennpunkte, in denen sich die achsenparallelen Strahlen vereinigen; die durch sie zur Achse senkrecht gelegten Ebenen, die Brennebenen, entsprechen den unendlich fernen Ebenen.

2. Die Hauptpunkte bezw. die durch sie gelegten Hauptebenen sind dadurch definiert, daß Bild und Objekt in ihnen gleich groß und gleich gerichtet sind.

3. Die Knotenpunkte haben die Eigenschaft, daß die durch sie gehenden konjugierten Strahlen einander parallel laufen.

Wie wir gesehen haben, sind mit Hilfe der Brennpunkte und der Brennweiten auch sofort die Oerter der Hauptpunkte und Knotenpunkte zu bestimmen. Es folgt daraus, daß alle Bestimmungsstücke für die Abbildung gegeben sind, wenn man die Brennweiten und eins der drei Paare von Kardinalpunkten kennt.

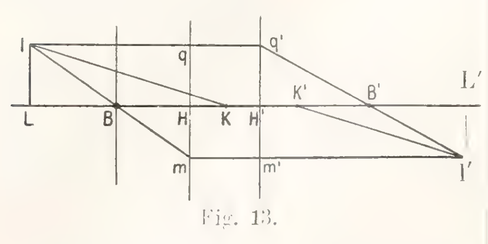


Fig. 13.

15. Geometrische Konstruktion konjugierter Bilder unter Benutzung der Brennpunkte, Hauptpunkte und Knotenpunkte. Es seien von einem Systeme die Lage der Brennpunkte B und B' (Fig. 13), der Hauptpunkte H und H' und der Knotenpunkte K und K' gegeben. Dann findet man durch Konstruktion zu einem beliebig gelegenen Objekt Ll sein zugehöriges Abbild L'l' auf folgende Weise. Wir wissen: Ein durch den vorderen Brennpunkt B zielender Strahl verläßt das System parallel zur Achse und ein parallel im Objektraum verlaufender Strahl geht durch den hinteren Brennpunkt B'. Um die so einander zugeordneten Strahlenpaare konstruieren zu können, errichtet man die positiven Hauptebenen, also Ebenen, welche durch die positiven Hauptpunkte H und H' senkrecht zur Achse gelegt sind.

Den achsenparallelen Strahl zieht man bis er die Hauptebene H' im Punkte q' schneidet und verbindet q' mit B'; den durch den vorderen Brennpunkt B gehenden Strahl LB verlängert man bis er die erste Hauptebene H schneidet und zieht durch den Schnittpunkt m die achsenparallele Gerade mm'. Wo sich diese Gerade mm' mit dem verlängerten Strahl q'B' schneidet (l') da liegt der Bildpunkt (l') vom Objektpunkt l. Demnach ist auch das auf die Achse gefallte Lot l'L' das Bild vom Objekt lL. Wie es den Hauptebenen zukommt, ist H'q' das Bild von Hq und H'm' das Bild von Hm.

Es genügen also zur Konstruktion des Bildes L'l' eines beliebig gelegenen Objektes die Kenntnis der Brennpunkte B und B' und der Hauptpunkte H und H', deren Lage bekannt ist, wenn außer den Brennpunkten auch noch die Brennweiten gegeben sind. Damit sind zugleich auch die Knotenpunkte K und K' bekannt (siehe den vorigen Abschnitt 14). Diese haben die Eigenschaft, daß die nach K und K' gezogenen konjugierten Strahlen lK und l'K' zueinander parallel laufen. Legt man also durch den hinteren Knotenpunkt K' eine Parallele K'l' zum Strahl lK, so muß der Bildpunkt l' auch auf dieser Parallelen K'l' liegen.

Die Hauptpunkte und Knotenpunkte allein genügen jedoch nicht zur Konstruktion, da sie nicht vier voneinander unabhängige Punkte sind. Es ist nämlich stets:

$$KH = K'H'$$

d. h. aber, es liegt K' rechts von H', wenn K rechts von H liegt und es liegt K' links von H', wenn K links von H liegt. Wo diese, wie bei den sogenannten „Linsen" einander gleich sind, fallen die Knotenpunkte mit den Hauptpunkten zusammen (vgl. Abschnitt 21).

16. Aequivalenz einer einzigen brechenden Kugelfläche zu einem zentrierten System. Sind die durch das zentrierte System getrennten Medien n und n' einander gleich, so kann das System in bezug auf seine Wirkung ersetzt werden durch eine einfache Linse (Abschnitt 21). Sind n und n' verschieden, so kann das System äquivalent gesetzt werden einer einzigen brechenden Kugelfläche S (Fig. 1 Abschnitt 3), deren Scheitel S mit dem vorderen Hauptpunkt H (Fig. 13) und deren Mittelpunkt M mit dem vorderen Knotenpunkt K koinzidiert. Tatsächlich läßt sich zeigen, daß diese einfache Kugelfläche dieselben Brennweiten SB = HB und SB' = H'B' wie das zentrierte System hat und zwar sowohl der Größe wie dem Vorzeichen nach. Konstruiert man für diese äquivalente Kugelfläche das zu einem Objekt konjugierte Bild nach den Regeln des vorigen Paragraphen, so ist bis auf die Lage auf der Achse dieses Bild in bezug auf Größe und Richtung identisch mit dem durch das zentrierte System entworfenen Bilde, wenn das System die gleichen Brennweiten besitzt wie die einfache Kugelfläche und die gleichen Medien n und n' voneinander trennt. Man nennt diese Kugelfläche dem System äquivalent.

Um auch die richtige Lage des Bildes auf der Achse zu erhalten, verschiebe man dasselbe parallel zu sich längs der Achse um eine Strecke, die der Größe und dem Vorzeichen nach übereinstimmt mit der gegenseitigen Entfernung HH' der Hauptpunkte des Systems.

Eine einzige brechende Kugelfläche kann man daher als ein System auffassen, in welchem die beiden Hauptpunkte mit dem Scheitel und die beiden Knotenpunkte mit dem Zentrum der Kugelfläche zusammenfallen.

17. Helmholtzsche Form der Abbildungsgleichungen. Rechnet man die Achsenstrecken von den Brennpunkten B

und B' (Fig. 14) aus und bezeichnet die Abstände konjugierter Ebenen mit x und x' und die seitlichen Entfernungen konjugierter Punktepaare mit y und y', so wird die ganze Abbildung bestimmt durch die Abbeschen Abbildungsgleichungen (Abschnitt 12):

$$xx' = FF'$$
$$\frac{y'}{y} = \frac{F}{x} = \frac{x'}{F'}.$$

Bezieht man die Lage zweier konjugierten Ebenen L und L' nicht auf die Brennpunkte, sondern, wie es zuerst Helmholtz getan hat, auf zwei andere konjugierte Ebenen, so nehmen die Abbildungsgleichungen kompliziertere Gestalt an. Wir wollen hier

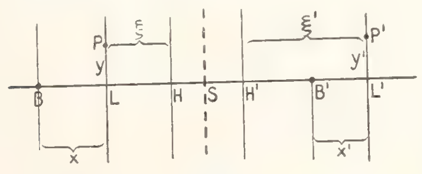


Fig. 14.

deren Form nur für den speziellen Fall angeben, daß statt eines beliebigen Ebenenpaars die positiven Hauptebenen zu Anfangsebenen gemacht werden, von denen aus die Strecken zu rechnen sind. Bezeichnen wir diese Abstände mit ξ und ξ', so nehmen die Abbildungsgleichungen folgende Form an:

$$\left.\begin{aligned} \frac{F}{\xi} + \frac{F'}{\xi'} &= -1 \\ \frac{y'}{y} = \frac{F}{F+\xi} &= \frac{F'+\xi'}{F'} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad 24)$$

Bei einer einzigen brechenden Fläche mit den Brennweiten F und F' hatten wir für die konjugierten Vereinigungsweiten s und s' die Gleichung gefunden (Abschnitt 6):

$$\frac{F'}{s'} + \frac{F}{s} = 1$$

Für das unendlich ferne Objekt ($s = \infty$) wird $s' = F'$, während nach Gleichung 24 für $\xi = \infty$ erhalten wird $\xi' = -F'$. Hiernach erscheint die hintere Brennweite F' eines Systems, welches parallel einfallende Strahlen im hinteren Brennpunkte sammelt, als eine negative Größe, dem gewöhnlichen Sprachgebrauch (Abschnitt 6) entgegen.

18. Definition der Linse. Einen ganz besonderen Typus eines zentrierten Systems brechender Kugelflächen stellen die „Linsen" dar. Unter einer „Linse" versteht man ein von zwei Kugelflächen 1 und 2 (Fig. 15) begrenztes Medium, umgeben von Luft. Es sei ν der relative Brechungsquotient des Linsenmaterials gegen Luft. Sollte die Linse in ein anderes Medium als Luft getaucht werden, so ist für ν eben nur der relative Brechungsquotient des Linsenmaterials gegen das andere Medium zu setzen, in welches die Linse getaucht ist.

Sämtliche Linsen können sich voneinander nur durch den Abstand S_1S_2 der beiden Kugelscheitel („Linsendicke"), durch die Größe und das Vorzeichen der beiden Kugelradien und durch das Linsenmaterial unterscheiden.

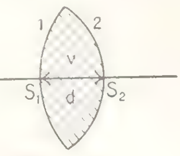


Fig. 15.

Je nach dem Vorzeichen der beiden Radien teilt man die Linsen ein in sechs Arten, welche in Figur 16a und 16b gezeichnet sind. In Figur 16a ist Nr. 1 eine bikonvexe, Nr. 2

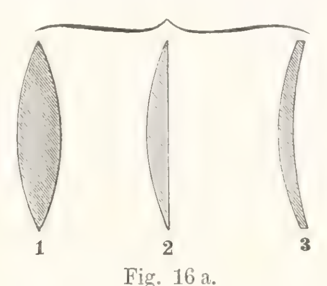


Fig. 16 a.

eine plankonvexe und Nr. 3 eine konvexkonkave Linse. Alle drei Sorten Linsen sind in der Mitte dicker als am Rande und im allgemeinen kollektive Systeme, d. h. sie haben reelle Brennpunkte und machen auffallende Strahlenbüschel konvergenter. In Figur 16b

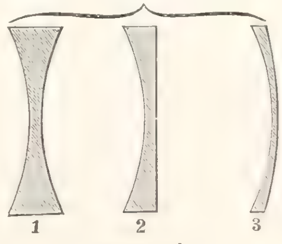


Fig. 16 b.

ist Nr. 1 eine bikonkave, Nr. 2 eine plankonkave, und Nr. 3 eine konvexkonkave Linse. Alle drei Arten sind in der Mitte dünner als am Rande und vermindern die Konvergenz der Strahlenbündel, d. h. sie vereinigen parallele Strahlen in virtuellem Brennpunkt (Dispansivsysteme).

Zunächst wollen wir die allen Linsenarten gemeinsamen Eigenschaften besprechen, ehe wir auf deren Unterschiede eingehen.

Dazu fassen wir die Linse als ein aus zwei Systemen zusammengesetztes System auf. Die Linse stellt das einfachste zusammengesetzte System dar, da es nur aus zwei einzelnen brechenden Kugelflächen zu-

sammengesetzt ist. Komplizierter sind die Projektionssysteme oder photographischen Systeme, welche meist aus mehreren Linsen bestehen. Noch komplizierter sind das Fernrohr und das Mikroskop, welche aus Objektiv und Okular zusammengesetzt sind, von denen sowohl das Objektiv wie das Okular wiederum je aus mehreren Linsen bestehen können und müssen, soll eine punktweise Abbildung für weitgeöffnete Büschel oder für endliche Objekte erzielt werden (vgl. den Artikel „Optische Instrumente“).

Wir wollen daher ganz allgemein die Theorie eines aus zwei Einzelsystemen S_1 und S_2 zusammengesetzten Gesamtsystems $S = S_1 + S_2$ erörtern, um durch Spezialisierung die Abbildung durch Linsen zu erhalten. Hierdurch allein wird deutlich herausspringen, warum man solch komplizierte Systeme wie das Fernrohr und Mikroskop verwendet.

19. Zusammensetzung zweier Einzelsysteme zu einem Gesamtsystem. Die Abbildung eines aus zwei Einzelsystemen S_1 und S_2 (Fig. 17) zusammengesetzten Systems

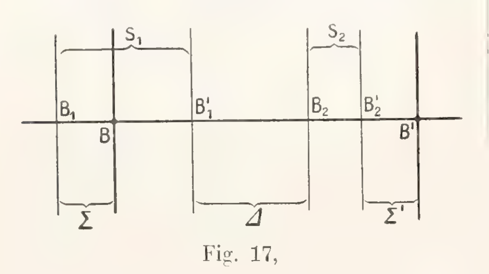


Fig. 17,

$S = S_1 + S_2$ ist vollkommen bestimmt, wenn vom Gesamtsystem S die Lage der Brennpunkte B und B′ und die Brennweiten des Gesamtsystems sowohl ihrer Größe als auch ihrem Vorzeichen nach gegeben sind. Zugleich sind dann auch die Hauptpunkte bekannt; mit Hilfe der Brennpunkte und der Hauptpunkte des Gesamtsystems ist aber zu jedem Objekt das vom Gesamtsystem entworfene Bild zu konstruieren (Abschnitt 15).

Unsere Aufgabe läuft also darauf hinaus, aus den Bestimmungsstücken der Einzelsysteme S_1 und S_2 die Lage der Brennpunkte B bezw. B′ und die Brennweiten F bezw. F′ des Gesamtsystems zu finden. Jedes Einzelsystem ist seinerseits vollkommen bestimmt, wenn von ihm die Lage seiner Brennpunkte und die Größe seiner Brennweiten gegeben ist. Diese Bestimmungsstücke der Einzelsysteme seien also gegeben. Es seien B_1 und B_1' die Brennpunkte des Einzelsystems S_1; B_2 und B_2' die Brennpunkte des Einzelsystems S_2; die zu S_1 gehörigen Brennweiten seien F_1 und F_1' und die zu S_2 gehörigen Brennweiten seien F_2 und F_2'.

Außerdem muß noch gegeben sein die Entfernung zwischen dem hinteren Brennpunkte B_1' des Systems S_1 und dem vorderen Brennpunkte B_2 des Systems S_2. Diese Strecke B_2B_1' werde als „Intervall“ bezeichnet und mit dem Zeichen Δ belegt. Es werde Δ negativ oder positiv genommen, je nachdem B_2 links oder rechts von B_1' liegt. Ist Δ positiv oder negativ, so sagt man, die Einzelsysteme haben ein positives oder negatives Intervall. Dieses Intervall spielt zumal beim Mikroskop und Fernrohr, den sogenannten „optischen Apparaten“, eine große Rolle. Beim Miskrokop ist Δ stets positiv, also wie in Figur 17, bei welcher das Gesamtsystem als Mikroskopsystem aufgefaßt werden kann, dessen Objektiv mit S, und dessen Okular mit S_2 identisch ist. Beim Fernrohr ist Δ = Null. Wo immer Δ positiv oder Null ist, entwirft das Gesamtsystem vom Objekt Bilder, die nach Lage und Richtung nicht durch eine einzige äquivalente brechende Kugelfläche dargestellt werden können, während dies der Fall ist bei einem zentrierten System (Abschnitt 16).

Des Raummangels wegen müssen wir hier die Herleitung der Konstanten des Gesamtsystems aus denjenigen der Einzelsysteme übergehen[1]) und uns mit der Angabe der Resultate begnügen. Bezeichnen wir den Abstand des vorderen Brennpunktes B des Gesamtsystems vom vorderen Brennpunkte B des Einzelsystems S_1 mit Σ, entsprechend den Abstand des hinteren Brennpunktes B′ vom hinteren Brennpunkt B_2' des Einzelsystems S_2 mit Σ', die vordere oder hintere Brennweite des Gesamtsystems mit F oder F′, so lauten die gewünschten Beziehungen:

$$\left.\begin{aligned} \Sigma &= \frac{F_1 . F_1'}{\Delta} \quad \text{und} \quad \Sigma' = -\frac{F_2 . F_2'}{\Delta} \\ F &= -\frac{F_1 . F_2}{\Delta} \quad \text{und} \quad F' = \frac{F_1' . F_2'}{\Delta} \end{aligned}\right\} \quad 25)$$

wo B rechts oder links von B_1 liegt (oder B′ rechts oder links von B_2'), wenn F positiv oder negativ (oder F′ positiv oder negativ) ist.

In bezug auf die Brennweiten des Gesamtsystems gilt wie bei einem Einzelsystem:

$$\frac{F'}{F} = -\frac{n'}{n} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 26)$$

wenn mit n der Brechungsquotient des Mediums vor dem Einzelsystem S_1 und mit n′ derjenige des Mediums hinter dem Einzelsysteme S_2 bezeichnet wird. Sind beide Medien wie beim Fernrohr oder Teleskop die gleichen (n = n′), so werden auch die Brennweiten des Gesamtsystems ihrem absoluten Betrage nach einander gleich (F′ = — F).

[1]) Näheres siehe bei O. Lummer, Die Lehre von der Strahlung. 2. Bd. Abteilg. II des Müller-Pouilletschen Lehrbuches des Physik 10. Auflage. Braunschweig.

20. Das teleskopische System als Spezialfall. Beim teleskopischen System ist $\Delta = 0$; für diesen Spezialfall werden gemäß den Formeln 25) beide Brennweiten unendlich groß. In Worten heißt das: Parallel einfallende Strahlenbüschel verlassen das Teleskop als wieder parallele Strahlenbüschel.

21. Abbildungskonstanten und gemeinsame Eigenschaften der Linsen. Die Linsen können aufgefaßt werden als zusammengesetzte Systeme aus zwei brechenden Kugelflächen, welche ein Medium gegen Luft abgrenzen. Ist der relative Brechungsquotient des Linsenmediums gegen Luft gleich ν (Fig. 18) und bezeichnen wir die

Fig. 18.

Radien der beiden Kugelflächen 1 und 2 mit r_1 und r_2, so sind die Brennweiten F_1 und F_1' des Einzelsystems S_1 (brechende Fläche 1) und die Brennweiten F_2 und F_2' des Einzelsystems S_2 (brechende Fläche 2) gegeben durch die Ausdrücke (Abschnitt 6):

$$\left.\begin{array}{l} F_1 = \dfrac{r_1}{\nu - 1}; \quad F_1' = -\dfrac{\nu\, r_1}{\nu - 1} \\[2ex] F_2 = \dfrac{\nu\, r_2}{1 - \nu}; \quad F_2' = -\dfrac{r_2}{1 - \nu} \end{array}\right| \quad . \quad 27)$$

wo r_1 und r_2 positiv oder negativ zu setzen ist, je nachdem das Licht die Konvexe oder konkave Seite der Kugelfläche 1 oder 2 trifft. Die Brennweiten der Einzelsysteme S_1 und S_2 sind also aus den Radien der brechenden Flächen 1 und 2 und aus dem Brechungsquotienten ν des Linsenmediums zu berechnen. Durch die Brennweiten von 1 und 2 ist aber auch die Lage der Brennpunkte B_1 und B_1' oder B_2 und B_2' beider Einzelsysteme gegeben, insofern ja bei einer einzigen Kugelfläche der Abstand des Brennpunktes vom Kugelscheitel gleich ist dem negativ genommenen Werte der Brennweite. Da laut Figur 18 Radius r_1 positiv und Radius r_2 negativ zu nehmen sind und $\nu - 1$ positiv ist, liegt B_1' rechts von S_1 und B_1 links von S_1 und ebenso liegt B_2' rechts von S_2 und B_2 links von S_2.

Setzen wir die Werte von F_1, F_1', F_2 und F_2' ein in die Ausdrücke 25 des Abschnittes 20 für die Konstanten des Gesamtsystems, so erhalten wir für die Abbildungskonstanten einer Linse:

$$\left.\begin{array}{l} F = \dfrac{\nu\, r_1\, r_2}{N} = - F' \\[2ex] \Sigma = -\dfrac{\nu\, r_1^2}{N} \ \text{und}\ \Sigma' = -\dfrac{\nu\, r_2^2}{N} \\[2ex] \text{wo}\ \ N = (\nu - 1)\,[(r_2 - r_1)\nu + d\,(\nu - 1)] \end{array}\right\} \quad 28)$$

und d die Strecke S_1S_2 oder die Linsendicke bedeutet, welche stets positiv zu nehmen ist. Für alle Linsen gilt also der Satz: Die beiden Brennweiten sind gleichgroß. Da sie entgegengesetzte Vorzeichen haben, so liegen die Brennpunkte auf verschiedenen Seiten der Linse, aber gleichweit von den zugehörigen Hauptpunkten entfernt. Sind H und H' also die Hauptpunkte, so ist dem absoluten Betrage nach Strecke HB = H'B' (nicht aber Strecke $S_1B = S_2B'$).

Die Formeln 28) liefern die Brennweiten und die Lage der Brennpunkte, wodurch also auch die Lage der Hauptpunkte gegeben ist. Um den Abstand der Hauptpunkte von den Kugelscheiteln direkt berechnen zu können, muß man die Strecken HS_1 und $H'S_2$ ausdrücken durch die Konstanten der brechenden Kugelflächen. Bezeichnet man $HS_1 = \psi$ und $H'S_2 = \psi'$, so wird:

$$\psi = \frac{(1 - \nu)\, r_1 d}{N} \quad \text{und} \quad \psi' = \frac{(1 - \nu)\, r_2 d}{N} \quad 29)$$

wo ψ oder ψ' positiv im Sinne der Lichtfortpflanzung zu rechnen sind.

Hieraus folgt die einfache Beziehung:

$$\frac{\psi'}{\psi} = \frac{r_2}{r_1} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 30)$$

d. h. die Lage der Hauptpunkte in bezug auf die Kugelscheitel hängt nur von den Krümmungsradien der beiden Kugelflächen ab.

Ferner läßt sich zeigen: Bei allen Linsen fallen die Hauptpunkte mit den Knotenpunkten zusammen.

Es existieren also bei den Linsen nur vier Kardinalpunkte, nämlich die Brennpunkte und die Hauptpunkte, welche zugleich die Rolle der Knotenpunkte übernehmen.

Besonders einfach gestalten sich die Formeln 28 und 29, wenn man im Ausdrucke für N die Größe $d\,(\nu - 1)$ gegenüber $\nu\,(r_2 - r_1)$ vernachlässigen darf (unendlich dünne Linsen). Es wird dann z. B. der Ausdruck für F:

$$F = \frac{\nu\, r_1 r_2}{\nu(\nu - 1) . (r_2 - r_1)}$$

woraus die wichtige Beziehung folgt:

$$\frac{1}{F} = (\nu - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 31)$$

22. Konstruktion der Linsenbilder. Es sei die gegenseitige Lage der Kardinalpunkte die in Figur 19 gezeichnete, wo B und B' die

Brennpunkte, H und H′ die Hauptpunkte und K und K′ die mit ihnen zusammenfallenden Knotenpunkte bedeuten. Um zu dem beliebigen Objekt Ll das konjugierte Bild zu

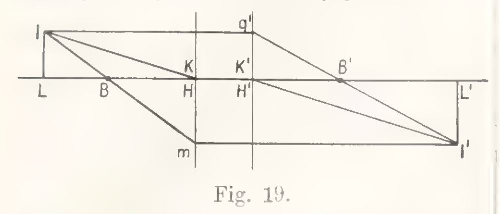


Fig. 19.

erhalten, verfährt man wie folgt. Man zieht durch l den achsenparallelen Strahl bis zum Schnittpunkt q′ mit der hinteren Hauptebene H′ und zieht die Gerade q′B′ durch den hinteren Brennpunkt B′. Ferner zieht man von l den Strahl lB durch den vorderen Brennpunkt B, bis er die vordere Hauptebene H im Punkte m schneidet und legt durch m eine Parallele zur Achse. Wo diese sich mit der Geraden q′B′ schneidet, ist der zu l konjugierte Bildpunkt l′ gelegen. Oder aber man wählt als zweiten Strahl den nach dem vorderen Knotenpunkt K zielenden Strahl lK und zieht vom hinteren Knotenpunkt K′ eine Parallele K′l′ zu lK.

23. Unendlich dünne Linsen. Besonders einfach gestaltet sich die Konstruktion der Linsenbilder, wenn die Linsendicke als unendlich klein angesehen werden kann („ideelle“ Linsen), was bei den meisten Linsen gestattet ist. Bei einer solchen unendlich dünnen oder ideellen Linse fallen die Scheitel beider Kugelflächen zusammen. Ferner wird $\psi = 0$ und $\psi' = 0$, also fallen sowohl die Hauptpunkte als auch die Knotenpunkte mit dem gemeinsamen Kugelscheitel S (Fig. 20) zusammen. Die durch S senkrecht zur Achse gelegte Ebene enthält somit beide Haupt- und Knotenebenen. Ein von l durch S gelegter Strahl geht also ungebrochen weiter. Ein von l parallel zur Achse gezogener Strahl aber zielt von q durch den hinteren Brennpunkt B′, während der Strahl lB durch den vorderen Brennpunkt B bei m parallel zur Achse weitergeht. Die drei Strahlen qB′, Sl′ und ml′ schneiden sich im Bildpunkt l′ und das von l′ auf die Achse gefällte Lot l′L′ ist das zu lL konjugierte Bild. Wir wollen die durch ideelle Linsen entworfenen Bilder etwas näher betrachten.

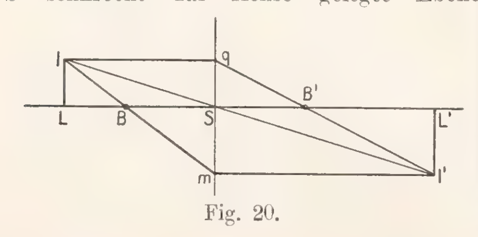


Fig. 20.

a) Sammellinsen. Figur 21 stellt den Verlauf der Strahlen in einer Sammellinse dar, da B′ rechts vom gemeinsamen Kugelscheitel S und B links davon gelegen ist. Bei der in Figur 21 angenommenen Lage des Objektes Ll entsteht also ein reelles, verkehrtes und vergrößertes Bild L′l′. Um zu erkennen, wie das Bild mit der Lage des Objektes sich ändert, brauchen wir nur das Objekt Ll parallel mit sich zu verschieben. Aus dem Vorhergehenden folgt, daß der Bildpunkt von l stets liegen muß auf dem verlängerten Strahl q B′ und dem verlängerten Strahl lS. Aus der Figur sind ohne weiteres folgende Regeln für die Lage, Größe und Richtung des Bildes einer Sammellinse zu entnehmen.

1. Reelle und umgekehrte Bilder entstehen, solange das Objekt Ll links vom vorderen Brennpunkt B liegt.

2. Rückt das Objekt aus dem Unendlichen zur vorderen Brennebene B, so wandert das reelle und umgekehrte Bild von der hinteren Brennebene B′ nach rechts ins Unendliche.

3. Solange der Objektsabstand LS größer ist als die doppelte Brennweite (LS > 2BS), ist das reelle und umgekehrte Bild kleiner als das Objekt; solange der Objektabstand kleiner ist als die doppelte Brennweite und größer als die einfache Brennweite (LS < 2 BS aber > BS), ist das reelle und umgekehrte Bild größer als das Objekt. Nur einmal sind Bild und Objekt gleichgroß, wenn nämlich Objekt- und Bildabstand gleich groß sind und zwar gleich der doppelten Brennweite (LS = 2BS). Da Objekt und Bild in diesem Falle gleichgroß und umgekehrt gerichtet sind, so befinden sie sich in den negativen Hauptebenen (y′/y = —1 vgl. Abschnitt 14).

4. Rückt das Objekt vom vorderen Brennpunkt B näher zum

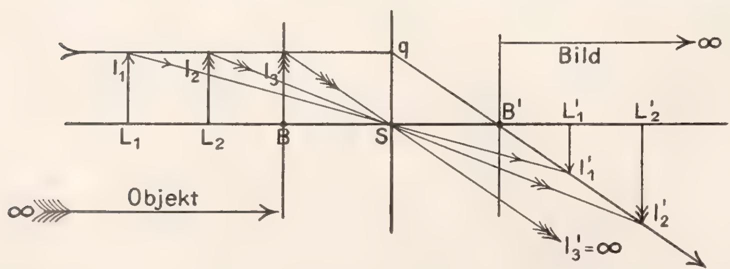


Fig. 21.

Linsenscheitel (Fig. 22) ($L_4S < BS$), so entsteht ein virtuelles und aufrechtes Bild und zwar für jede Lage zwischen B und S.

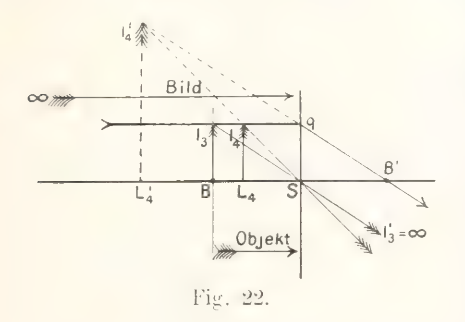


Fig. 22.

5. Stets ist das virtuelle und aufrechte Bild größer als das Objekt. Sie werden an Größe um so ähnlicher, je näher das Objekt an den Linsenscheitel S heranrückt.

6. In allen möglichen Fällen ist die Abbildung eine rechtläufige, da das Bild von links nach rechts wandert, wenn das Objekt von links nach rechts geht und umgekehrt.

b) Zerstreuungslinsen. Einfacher gestalten sich die Abbildungsverhältnisse an einer Zerstreuungslinse (Fig. 23). Bei

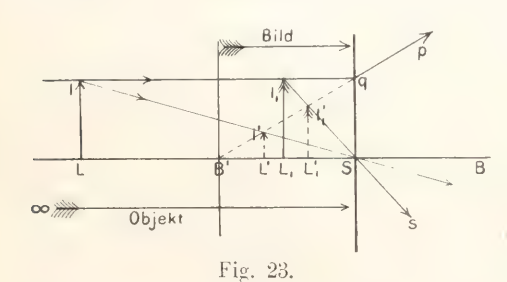


Fig. 23.

ihr liegt der vordere Brennpunkt B rechts vom Linsenscheitel S und der hintere Brennpunkt B' links von S. Auch bei ihr geht Strahl lS ungebrochen weiter; der achsenparallele Strahl lq wird jedoch längs qp gebrochen, als ob er vom hinteren Brennpunkt B' ausgegangen wäre. Die zu den beiden Strahlen lq und lS konjugierten Strahlen qp und Ss schneiden sich nicht reell, sondern erst rückwärts verlängert. Der zu l konjugierte Bildpunkt l' ist also virtuell. Verschiebt man das Objekt Ll parallel zu sich längs der Achse, so liegt also der zu l konjugierte Bildpunkt l' stets auf dem ungebrochenen Strahl lS und dem rückwärts verlängerten Strahl qp d. h. auf der Strecke B'q da, wo sie vom Strahl lS geschnitten wird; zum Objekt L_1l_1 gehört das Bild $L_1'l_1'$. Wir erhalten also folgende Regel für die Lage, Größe und Richtung des Bildes:

1. Eine Zerstreuungslinse erzeugt stets virtuelle, aufrechte und verkleinerte Bilder.

2. Wandert das Objekt aus dem Unendlichen bis zum Linsenscheitel, so sein Bild vom hinteren Brennpunkt B' ebenfalls bis zum Scheitel; in ihm sind Objekt und Bild gleichgroß und gleichgerichtet.

3. Die Abbildung ist eine rechtläufige.

24. Lage der Haupt- und Brennpunkte bei den verschiedenen Linsensorten. Das gleiche Material der Linse vorausgesetzt, unterscheiden sich die möglichen Linsensorten allein noch durch das Vorzeichen und die Größe der Radien beider Kugelflächen. Wir wollen für die verschiedenen Linsensorten die Abbildungskonstanten berechnen unter der Annahme, daß das Linsenmaterial aus Glas vom Brechungsquotienten $\nu = {}^3/_2$ besteht. Gemäß den Formeln 28 und 29 erhalten wir dann:

$$\left.\begin{aligned} F &= \frac{3\,r_1\,r_2}{2\,N} = -F' \\ \Sigma &= -\frac{3\,r_1^2}{2\,N};\quad \Sigma' = -\frac{3\,r_2^2}{2\,N} \\ \psi &= \frac{d\,r_1}{2\,N};\quad \psi' = -\frac{d\,r_2}{2\,N} \\ 4\,N &= 3(r_2 - r_1) + d \end{aligned}\right\} \quad \ldots 31)$$

1. Bikonvexlinsen (Fig. 24). Hier

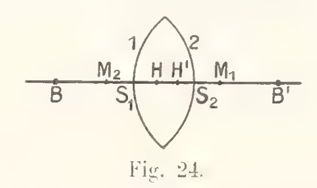


Fig. 24.

ist r_1 positiv und r_2 negativ, der absolute Wert beider gleichgroß. Es werde dieser mit r bezeichnet, so daß gilt: $r_1 = -r_2 = r$. Es wird dann:

$$\left.\begin{aligned} 4N &= d - 6r \\ F &= -\frac{3\,r^2}{2N} = -F' \\ \psi &= \frac{d\,r}{2\,N} = -\psi' \end{aligned}\right\} \quad \ldots 32)$$

Da r positiv zu nehmen ist, so hängt das Vorzeichen der Brennweite F nur ab vom Vorzeichen des Wertes N. Ist $d < 6r$ so wird F positiv und die Bikonvexlinse wirkt kollektiv. Ist $d = 6r$, so wird F unendlich; die Bikonvexlinse wirkt teleskopisch und verwandelt parallele Büschel in wieder parallele Büschel. Ist $d > 6r$, so wird F negativ; die Bikonvexlinse wirkt zerstreuend (dispansiv).

Praktisch ist wohl immer $d < 6r$, so daß wir die Bikonvexlinse als Sammellinse ansprechen dürfen. Für so kleine Dicken

erhält man $\psi = \frac{d}{3} = -\psi'$; die Lage der Kardinalpunkte ist also die in Figur 24 gezeichnete, wo M_1 und M_2 die Mittelpunkte der beiden gleichgroßen Kugelflächen bedeuten.

2. Bikonkavlinsen (Fig. 25). Hier ist r_1 negativ und r_2 positiv, der absolute Wert r beider gleichgroß. Es wird also $-r_1 = +r_2 = r$ und somit:

$$\left.\begin{aligned} N &= \frac{3r}{2} + \frac{d}{4} \\ F &= -\frac{3r^2}{2N} = -F^1 \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots 33)$$

woraus folgt: Die Bikonkavlinsen sind stets Zerstreuungslinsen. Für kleine Werte von d wird $F = -(r - d/6) = -F'$ und $\psi = \frac{d}{3} = -\psi'$, so daß die Kardinalpunkte die in Figur 25 gezeichnete Lage haben.

Fig. 25.

3. Plankonvexlinsen. Hier ist entweder r_1 positiv und $r_2 = \infty$ oder $r_1 = \infty$ und r_2 negativ. In beiden Fällen wird F positiv und dem absoluten Betrage nach gleich $2r_1$ oder $2r_2$. Die Plankonvexlinsen wirken also, gleichviel ob das Licht auf die gekrümmte oder ebene Fläche auftrifft, als Sammellinsen. Im ersteren Falle ist $\psi = 0$ und $\psi' = 2d/3$; im letzteren dagegen: $\psi' = 0$ und $\psi = 2d/3$. In beiden Fällen koinzidiert also der eine Hauptpunkt mit dem Scheitel der gekrümmten Fläche, während der andere Hauptpunkt im Innern der Linse um $^2/_3$ der Linsendicke von Scheitel der Planfläche entfernt liegt.

4. Plankonkavlinsen. Hier ist entweder r_1 negativ und $r_2 = \infty$ oder $r_1 = \infty$ und r_2 positiv. Für beide Fälle wird F negativ und dem absoluten Betrage nach gleich $2r_1$ oder $2r_2$. Die Plankonkavlinsen sind also Zerstreuungslinsen. Im ersten Falle wird $\psi = 0$ und $\psi' = -2d/3$; im letzten Falle $\psi' = 0$ und $\psi = +2d/3$; also gilt für die Lage der Hauptpunkte das in Nr. 3 Gesagte.

5. Konkavkonvexe oder konvexkonkave Linsen (Menisken). Es haben stets beide Radien das gleiche Vorzeichen, gleichviel ob das Licht auf die konvexe oder konkave Seite der Linse auffällt. Im ersteren Falle ist die Linse eine konvexkonkave, im letzteren Falle eine konkavkonvexe. In beiden Fällen hat die Brennweite den Wert:

$$F = \frac{3r_1r_2}{2N} = -F'$$

sie hat also dasselbe Vorzeichen wie N, gleichviel, ob r_1 und r_2 positiv oder beide negativ sind. Je nachdem also N positiv, Null oder negativ ist, wird F positiv, unendlich oder negativ d. h. der Meniskus wirkt kollektiv, teleskopisch oder zerstreuend. Wir wollen drei Fälle besonders betrachten.

a) Radius der konkaven Fläche größer als der der konvexen Fläche. Dann ist $r_2 - r_1$ stets positiv, also auch N und F, gleichviel ob beide Radien positiv oder beide Radien negativ sind. Diese Menisken sind stets Sammellinsen.

b) Beide Flächen gleichstark gekrümmt. In diesem Falle ist $r_2 - r_1 = 0$, also $N = +d/4$ und somit auch F positiv, gleichviel ob beide Radien positiv oder beide negativ sind. Diese Menisken wirken ebenfalls stets als Sammellinsen.

c) Radius der konkaven Fläche kleiner als der der konvexen Fläche. Hier wird $r_2 - r_1$ stets negativ, gleichviel ob das Licht von links oder rechts kommt und das Vorzeichen von N hängt vom Größenverhältnis zwischen der Linsendicke d und dem Größenunterschied δ der absoluten Radien ab. Ist $d > 3\delta$ so ist der Meniskus kollektiv; ist $d = 3\delta$, so wirkt er teleskopisch und ist $d < 3\delta$, so wirkt er zerstreuend.

In der Regel ist $d < 3\delta$, so daß man unter dieser beschränkenden Annahme für alle Menisken die Regel aufstellen kann: Ist ein Meniskus in der Mitte dicker oder dünner als am Rande, so wirkt er als Sammellinse oder Zerstreuungslinse. Und schließen wir im Falle der Bikonvexlinsen die praktisch nie vorkommenden Fälle sehr großer Linsendicke ($d = 6r$ und $d > 6r$) aus, so gilt ganz allgemein die Regel:

Linsen, welche nach dem Rande zu dünner werden, sind Sammellinsen; Linsen, welche nach dem Rande zu dicker werden, sind Zerstreuungslinsen.

25. Experimentelle Bestimmung der Brennweiten von Linsen (Demonstration der Linsengesetze). Wir setzen hierbei Linsen von geringer Dicke voraus, so daß das Abbildungsgesetz gilt (Abschnitt 17):

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{F}$$

wo s (Fig. 26) die Entfernung des Objektes Ll vom Linsenmittelpunkt S, s' die Entfernung des Bildes L'l' von S und F die Größe der vorderen Brennweite bedeutet.

Gemäß Figur 26 ist die Linse S kollektiv. Sie entwirft also vom Objekt ein reelles

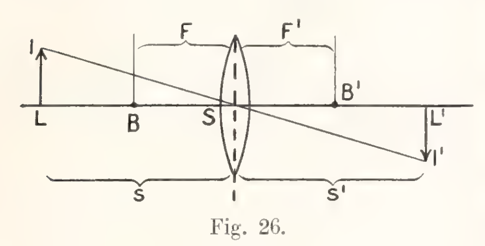


Fig. 26.

Bild, solange der Objektabstand s größer als die Brennweite ist ($s > F$). Um daher die Brennweite zu finden, braucht man nur die Abstände s und s' des Objektes und seines reellen Bildes vom Linsenmittelpunkt zu messen. Dazu bedient man sich am besten einer optischen Bank nach Art einer Photometerbank, auf der meßbar verschiebbar angebracht sind ein Schlitten, der das Objekt trägt, ein Schlitten, der die Linse trägt und ein Schlitten, der einen weißen Schirm trägt, auf welchem man das reelle Bild auffängt. Als Objekt wählt man am besten eine Glühlampe mit geradem Kohlenfaden oder eine Nernstlampe. Geeignet ist auch eine von hinten beleuchtete Glasskala.

Mit einer solchen Meßvorrichtung kann man auch die Linsengesetze demonstrieren. Um die Brennweite ($-\varphi_1$) einer Zerstreuungslinse experimentell zu bestimmen, kombiniert man diese mit einer Sammellinse von bekannter, aber kleinerer Brennweite $+\varphi_2$ zu einem Gesamtsystem und entwirft mit diesem kollektivwirkenden Gesamtsystem von einem Objekt sein reelles Bild. Hat man aus s und s' die positive Brennweite F des Gesamtsystems gefunden, so erhält man durch Anwendung der Formel:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{\varphi_2} - \frac{1}{\varphi_1}$$

die gesuchte Brennweite φ_1 der Zerstreuungslinse.

Direkt ist folgendes, freilich sehr ungenaue Verfahren in Anwendung zu bringen. Man läßt die vom Heliostaten kommenden Sonnenstrahlen auf die z. B. bikonkave Linse L (Fig. 27) fallen und fängt die aus-

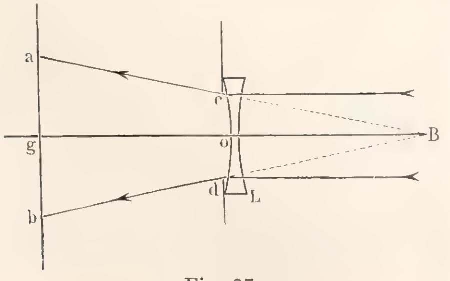


Fig. 27.

tretenden divergierenden Strahlen auf einem Schirme auf. Der daselbst entstehende Lichtfleck hat die Gestalt der Linsenfassung und ist um so größer, je größer der Abstand zwischen Schirm und Linse ist. Um möglichst deutliche Ränder des Lichtfleckes zu erhalten, blendet man die Linse durch eine scharfkantige, kreisförmige Blende cd ab. Den Abstand des Schirmes wählt man so, daß der Durchmesser des hellen Kreises ab gerade doppelt so groß ist, als der Durchmesser cd der Blende; dann ist der Abstand go des Schirmes von der Linse L gleich deren Brennweite oB.

Literatur. *Geschichtliches. Vgl. den Artikel „Abbildungslehre" und außerdem:* ***Paul La Cour und Jakob Appel,*** *Die Physik auf Grund ihrer geschichtlichen Entwickelung usw. Deutsch von* ***G. Siebert.*** *Braunschweig 1905, Bd. I, S. 81—120.*

Zusammenhängende Darstellungen und Originalwerke. Vgl. den Artikel „Abbildungslehre" und außerdem: ***J. Classen,*** *Mathematische Optik. Leipzig 1901. —* ***C. M. Gariel,*** *Etudes d'Optique géometrique, dioptres, systèmes centrés, lentilles etc. Paris 1889. —* ***A. Kerber,*** *Beiträge zur Dioptrik. Heft 1. Leipzig 1892. 2. bis 5. Heft. Leipzig 1896 bis 1899. —* ***H. Fr. L. Matthiessen,*** *Grundriß der Dioptrik geschichteter Linsensysteme usw. Leipzig 1877. —* ***F. Meisel,*** *Geometrische Optik usw. Halle 1886. —* ***G. G. Neumann,*** *Die Haupt- und Brennpunkte eines Linsensystems. Elementare Darstellung der durch Gauß begründeten Theorie. Leipzig 1866. —* ***E. Reusch,*** *Konstruktionen zur Lehre von den Haupt- und Brennpunkten eines Linsensystems. Leipzig 1870. —* ***A. Steinheil und E. Voit,*** *Handbuch der angewandten Optik. Bd. I, Leipzig 1891. —* ***P. Zech,*** *Elementare Behandlung von Linsensystemen. Tübingen. —* ***H. Zinken*** *genannt* ***Sommer,*** *Untersuchungen über die Dioptrik der Linsensysteme. Braunschweig 1870.*

Abhandlungen. Vgl. den Artikel „Abbildungslehre" und außerdem: ***J. L. de Lagrange,*** *Sur une loi générale d'Optike. Mém. de Berlin 1803. Die Priorität der sogenannten „Lagrangeschen Beziehung" gebührt* ***R. Smith*** *wie Lord* ***Rayleigh*** *im Phil. Mag. 1886,* ***21,*** *466—476 nachgewiesen hat. —* ***A. Beck,*** *Die Fundamentaleigenschaften der Linsensysteme in geometrischer Darstellung. Schlömilchs Z. S. 1873,* ***18,*** *588—600. —* ***C. Bender,*** *Neue konstruktive Bestimmung von Bild- und Gegenstandsweite bei sphärischen Linsen. Pogg. Ann. 1876,* ***157,*** *483—486. —* ***F. W. Bessel,*** *Ueber die Grundformeln der Dioptrik. Astr. Nachr. 1841,* ***18,*** *97—108. —* ***R. S. Cole,*** *Graph. methods for lenses. Phil. Mag. 1896,* ***41,*** *216—217. —* ***J. A. Gruner,*** *Ueber merkwürdige Punkte der Spiegel- und Linsensysteme. Gruners Archiv 1867,* ***47,*** *84—105. —* ***V. v. Lang,*** *Zur Dioptrik eines Systems zentrierter Kugelflächen. Wien. Ber. 1871,* ***63,*** *666—672; Carl. Rep. 1872,* ***8,*** *20—25; Pogg. Ann. 1873,* ***149,*** *353—359. —* ***J. B. Listing,*** *Ueber einige merkwürdige Punkte in Linsen und Linsensystemen. Bericht d. Naturf.-Vers. 1865; Pogg. Ann. 1866,* ***129,*** *466—72; Astr.*

Nachr. 1867, ***68****, 129—134.* — ***A. F. Möbius****, Kurze Darstellung der Haupteigenschaften eines Systems von Linsengläsern. Crelles Journ. 1829,* ***5****, 113—132.* — ***Derselbe****, Principales Propriétés d' un système de lentilles. Nouv. Ann. Math. 1845,* ***3****, 667—673.* — ***C. Moser****, Die Grundformeln der Dioptrik für den praktischen Gebrauch. Prager Sitzungsber. 1881, 141—166.* — ***L. Moser****, Methode, die Brennweite und Hauptpunkte von Linsen zu bestimmen. Pogg. Ann. 1844,* ***63****, 39—48.*

O. Lummer.

Lissajous

Jules Antoine.

Geboren am 4. März 1822 in Versailles; gestorben am 19. Juni 1880 in Plombious-lez-Dijon. Er trat 1841 in die École normale supérieure ein, war Professor am Collège Saint-Louis in Paris, 1874 Rektor der Akademie zu Chambéry, 1875 bis 1879 jener zu Besançon, wurde 1879 zum korrespondierenden Mitglied der Pariser Akademie gewählt. Während der Belagerung von Paris 1870 konstruierte Lissajous einen optischen Telegraphen, der jetzt in der französischen Armee eingeführt ist. Um ihn für die Armeen in der Provinz einzurichten, verließ er die eingeschlossene Hauptstadt im Luftballon. Bekannt ist sein Name besonders durch die Lissajousschen Kurven.

E. Drude.

Lithiumgruppe.

a) Lithium. b) Natrium. c) Kalium. d) Rubidium. e) Caesium. f) Kupfer. g) Silber. h) Gold.

a) Lithium.

Li. Atomgewicht 6,94.

1. Vorkommen; 2. Gewinnung; 3. Eigenschaften; 4. Nachweis und quantitative Bestimmung; 5. Spezielle Chemie; 6. Thermochemie; 7. Photochemie.

1. Vorkommen. In geringen, spektralanalytisch nachweisbaren Mengen ist Lithium in Mineralien weit verbreitet. Infolgedessen findet es sich auch in sehr vielen Mineralquellen, vor allem in kochsalzhaltigen.

So enthält z. B. ein Liter Wasser folgender Quellen Milligramme Lithium: Ems (Kesselbrunnen) 0,7; Karlsbader Sprudel 2,6; Kissingen (Rákóczy) 3,3; Marienbad (Ferdinand) 3,6; Bilin 3,7; Aßmannshausen 7,1; Baden-Baden (Friedrich) 9,6; Kreuznach (Elisabeth) 10,8; Salzschlirf (Bonifacius) 36,0.

Ebenso enthält die Asche vieler Pflanzen kleine Mengen Lithium, z. B. die des Tabaks, Zuckerrohrs, Seetangs usw.

Größere Mengen von Lithium enthalten die Mineralien:

Triphyllin $Li(Na)(Fe\,Mn)PO_4$ bis zu 9,6% Li_2O
Amblygonit $Li(Al\,F)PO_4$ von 3,5 bis 10,1% Li_2O
Petalit $Li(Na)AlSi_4O_{10}$ bis zu 4,9% Li_2O
Lepidolith (Lithionglimmer) $KLiAl_2F_2Si_3O_9$ 4,1% Li_2O
Zinnwaldit (Lithionit), ebenfalls ein Alkali-Aluminiumfluorsilikat, 1,5—5% Li_2O
Spodumen (Triphan) $LiAl(SiO_3)_2$ 8,07% Li_2O.

Lithium wurde im Jahre 1817 von Arfvedson im Petalit entdeckt. Der Entdecker erkannte bereits die Aehnlichkeit der Lithiumverbindungen mit denen der Alkalien; die Isolierung des Metalls gelang aber erst Bunsen und Matthiessen im Jahre 1855. Der Name Lithium ist abgeleitet von λίθος (Stein).

2. Gewinnung. a) Von Lithiumsalzen aus Mineralien. Lithiumhaltige Silikate (Lepidolithe) werden durch Glühen mit CaO; $CaSO_4$; K_2SO_4; $CaCO_3$ oder den entsprechenden Bariumsalzen aufgeschlossen. Man trennt dann in dem in Wasser löslichen Teil die Alkalien von den übrigen Metallen durch Ausfällen dieser mit einem Gemisch von NH_3, $(NH_4)_2S$ und $(NH_4)_2C_2O_4$. Auch mit konzentrierter Schwefelsäure läßt sich Lepidolith aufschließen. Triphyllin wird mit konzentrierter Schwefelsäure unter Zusatz von Salpetersäure erhitzt und der unlösliche Rückstand entfernt. Die beim Verdampfen der Lösung entstehende Salzmasse kocht man mit Wasser aus und entfernt jetzt die Mangan- und Magnesiumsalze aus der Lösung durch Erhitzen mit $Ca(OH)_2$, worauf dieses mit NH_3 und $(NH_4)_2C_2O_4$ gefällt wird. Zur Trennung des Lithium von den Alkalien benutzt man entweder die geringe Löslichkeit des Lithiumphosphats in Wasser oder die größere Löslichkeit des Lithiumchlorids in Aether-Alkohol (s. quantitative Bestimmung).

b) Von metallischem Lithium aus Lithiumsalzen. Lithiumchlorid wird in einem Porzellantiegel über der Bunsenflamme geschmolzen und mit einem Strom von 6 Bunsenelementen elektrolysiert. Als Anode dient ein Kohlestab, als Kathode ein Eisendraht. An diesem entsteht alsbald ein Regulus, der mit einem Eisenlöffel aus der Schmelze entfernt und in Steinöl abgekühlt wird. Um die Schmelztemperatur zu erniedrigen und dadurch die Ausbeute zu verbessern, verwendet man besser ein Gemisch von Lithiumbromid und 10—15% Lithiumchlorid. Durch Elektrolyse einer Lösung von Lithiumchlorid in Pyridin mit einer Stromdichte von 0,2—0,3 Amp. pro cm^2 erhält man bei Verwendung eines Kohlestabes als Anode und eines Eisendrahtes als Kathode Lithium als zusammenhängende Masse. Ein 0,875 proz. festes Lithiumamalgam entsteht bei der Elektrolyse

einer wässerigen Lithiumsalzlösung, wenn Quecksilber die Kathode bildet.

Die Verwednung von Lithiumsalzen ist sehr beschränkt. Lithiumhaltige Mineralwässer werden bei harnsaurer Diathese verordnet; ihre günstige Wirkung führt man auf die Leichtlöslichkeit des harnsauren Lithiums zurück.

3. **Eigenschaften.** Lithium ist ein silberweißes Metall, das auf frischer Schnittfläche gelblich anläuft. Sehr dünne Schichten erscheinen im durchfallenden Licht rotbraun. Es ist härter als Natrium und Kalium, Härte 0,6 nach Mohs. Lithium läßt sich zu Draht ausziehen und bei gewöhnlicher Temperatur durch Zusammenpressen schweißen. d^{20} 0,534, es ist der spezifisch leichteste aller festen Körper, sein Atomgewicht ist 6,94. Atomvolumen 13,0. Kompressibilität bei 20° zwischen 100 und 500 Atmosphäıen $8,8.10^{-6}$ pro Megabar. Fp. = 186°; spezifische Wärme 0,9408. Atomwärme 6,6. Elektrische Leitfähigkeit bei 20° 20,4 (Ag = 100). Das Molekulargewicht des in Quecksilber gelösten Lithiums wurde durch Messung der Dampfspannungserniedrigung zu 7,1, also gleich dem Atomgewicht bestimmt.

Das Lithiumion ist einwertig und farblos, es ist schwächer elektroaffin als die Ionen der anderen Alkalimetalle.

Die Lithiumsalze sind in wässeriger Lösung stark dissoziiert. Die folgende Tabelle gibt die molekularen Leitfähigkeiten einiger Lithiumsalze bei 25° in reziproken Ohm.

durchgang mißt. Auf die Weise wurde die Hydratation des $Li^{\cdot}$ = 4,7; des $Na^{\cdot}$ = 2,0; des $K^{\cdot}$ = 1,3 gefunden, wenn die Hydratation des Cl' = 0 gesetzt wird. Die Hydratation wächst also in der Alkaligruppe mit abnehmendem Atomgewicht.

Für eine Hydratation des Lithiums spricht auch ein Vergleich des Durchmessers des freien Atoms mit dem des Lithiumions. Für jenen wurde berechnet $2,01.10^{-8}$, für diesen $4,52.10^{-8}$.

Die absolute Wanderungsgeschwindigkeit des Lithiumions ist bei 18° und einem Spannungsabfall von 1 Volt pro cm 0,000346 cm/sec.

Das elektrolytische Potential wurde zu $\varepsilon_h = -2,41$ Volt berechnet, wenn das Potential der Wasserstoffelektrode gleich Null gesetzt wird.

Die Ionisierungswärme des Lithiumchlorids in $^1/_{10}$ normaler Lösung bei 35° ist gleich + 0,399 Cal., d. h. beim Zerfall in die Ionen wird Wärme entwickelt.

Als erstes Element der ersten Gruppe des periodischen Systems zeigt das Lithium in seinen Verbindungen teils die Eigenschaften der Alkalien, teils die der Erdalkalien. Mit ersteren hat es gemein die Löslichkeit des Sulfats, Hydroxyds usw., mit letzteren die Schwerlöslichkeit des Karbonats und Phosphats.

4. **Nachweis und quantitative Bestimmung.** Lithiumsalze färben die Bunsenflamme karmoisinrot. Lithiumionen bilden

Liter / Mol	32	64	128	256	512	1024
LiCl	103,8	106,5	109,8	112,4	114,6	116,1
LiJ	103,8	106,4	110,6	112,0	114,0	114,5
$LiClO_3$	91,5	94,2	96,8	99,4	100,4	101,5
$LiClO_4$	101,5	104,8	107,6	109,9	111,9	113,1
$LiNO_3$	97,9	100,7	104,1	106,6	108,2	108,7
$LiMnO_4$	87,2	90,2	94,0	96,5	98,8	101,5

Die in nichtwässerigen Lösungsmitteln löslichen Lithiumsalze sind darin ebenfalls zum Teil stark dissoziiert.

Die Beweglichkeit des Lithiumions ist relativ klein, bei 18° l_{18} = 33,44 (Temperaturkoeffizient a_{18} = 0,0265). Die Beweglichkeit der Alkaliionen nimmt mit steigendem Atomgewicht des Alkalimetalls zu: eine Erscheinung, die zur Annahme einer starken Hydratation des Lithiumions führen muß, da im allgemeinen die Beweglichkeiten komplexer Ionen abnehmen mit zunehmender Zahl und Masse der Atome in den Komplexen. Nach Nernst kann man nun die Ionenhydratation dadurch nachweisen, daß man die Konzentrationsänderung eines der Lösung zugesetzten Nichtelektrolyten an der Anode und Kathode beim Strom-

mit den Anionen der Phosphorsäure, Kohlensäure und Fluorwasserstoffsäure schwer lösliche Salze.

Na_2HPO_4 fällt schon aus mäßig konzentrierten Lösungen beim Kochen weißes Li_3PO_4. Neutralisiert man die bei der Reaktion entstehende Säure durch Natronlauge, verdampft zur Trockne und nimmt den Rückstand mit ammoniakalischem Wasser auf, so lassen sich auch geringe Mengen Lithium mit Sicherheit nachweisen.

NH_4F erzeugt in ammoniakalischer Lösung einen weißen Niederschlag von LiF. Verdampft man zur Trockne und behandelt mit verdünntem NH_3, so ist die Reaktion sehr empfindlich.

$(NH_4)_2CO_3$ fällt aus ammoniakalischer, konzentrierter Lösung beim Erhitzen weißes

Li_2CO_3. Die Fällung wird verhindert durch Anwesenheit von viel Ammonium- oder Alkalichlorid.

Die Löslichkeiten der analytisch wichtigen Lithiumsalze sind:

100 Teile Wasser lösen bei ca. 15° 0,0394 g Li_3PO_4

100 Teile Wasser + NH_3 lösen bei ca. 15° 0,0255 g Li_3PO_4

100 Teile Wasser lösen bei ca. 18° 0,27 g LiF

100 Teile Wasser + (NH_3 + NH_4F) lösen bei ca. 18° 0,0286 g LiF

100 Teile Wasser lösen bei ca. 15° 1,31 bis 1,37 g Li_2CO_3.

Die Empfindlichkeit der mikrochemischen Reaktion steht jener der spektralanalytischen weit nach. Allen benutzten Kristallisationen von Lithiumsalzen ist eine gewisse Unbestimmtheit der Formen eigentümlich. Die meist charakteristische Form ist das Li_2CO_3, das aus konzentrierteren Lösungen in stachelspitzigen Kugeln mit Aggregatpolarisation abgeschieden werden kann.

Bei der quantitativen Bestimmung bringt man entweder Li_2SO_4 oder LiCl zur Wägung. Da letzteres hygroskopisch ist, so muß die Wägung unter Ausschluß von feuchter Luft erfolgen. Zur Trennung des Lithiums von den übrigen Alkalien benutzt man die Löslichkeit des wasserfreien LiCl in Amylalkohol.

Löslichkeit von	LiCl	in	Amylalkohol	1: 15
,, ,,	NaCl	,,	,,	1: 30 000
,, ,,	KCl	,,	,,	1: 24 000

Die möglichst konzentrierte Lösung versetzt man mit 6 bis 8 ccm Amylalkohol und erhitzt unter Durchleiten von Luft bis alles Wasser verdampft ist. KCl und NaCl scheidet sich alsbald aus. Man versetzt nun die Amylalkohollösung mit 3 bis 4 Tropfen konzentrierter Salzsäure und kocht einige Minuten, um das durch Hydrolyse entstandene LiOH in Lösung zu bringen. Dann filtriert man noch warm durch ein Asbestfilter und wäscht den Rückstand mit heißem Amylalkohol aus. Das Filtrat wird verdampft (Sdp. des Amylalkohols 132°), der Rückstand in Wasser gelöst, mit H_2SO_4 versetzt und auf dem Wasserbade eingedampft. Sodann raucht man die Schwefelsäure ab, glüht schwach und wägt. Ein Zusatz von $(NH_4)_2CO_3$ ist unnötig, da $LiHSO_4$ leicht in Li_2SO_4 übergeht.

Auch die Extraktion des Gemisches der trockenen Chloride mit einem Gemisch gleicher Teile absoluten Alkohols und Aethers, das mit Chlorwasserstoffgas gesättigt wurde, ist zu empfehlen.

5. Spezielle Chemie. Infolge seiner großen Lösungstension zersetzt Lithium das Wasser, ebenso wie Natrium, doch ohne dabei zu schmelzen. Von HCl und verdünnter H_2SO_4 wird es unter stürmischer Wasserentwickelung gelöst, während es von kalter konzentrierter H_2SO_4 nur langsam angegriffen wird. Rauchende oder konzentrierte HNO_3 oxydiert äußerst heftig, so daß das Metall schmilzt und sich entzündet. In Fluor-, Chlor-, Brom- oder Joddampf verbrennt es bei gewöhnlicher Temperatur mit blendend weißem Licht. Sind die Gase jedoch absolut trocken, so wirken sie nicht ein, ebenso verhält sich trockener Sauerstoff. Mit absolutem Alkohol bildet Lithium Alkoholat.

Lithiumhydrid LiH bildet sich unter Feuererscheinung, wenn man in einem schwer schmelzbaren Glasrohr Lithium im Eisenschiffchen beim Durchleiten von Wasserstoff erhitzt. Weiße, harte Masse, beständiger als die Hydride der anderen Alkalienmetalle. Von Wasser wird es zersetzt. Fp. 680°.

Lithiumfluorid LiF. Aus einer Lösung von Lithiumkarbonat in Flußsäure scheidet sich beim Kochen das schwer lösliche Salz körnig ab. In regulären Oktaedern, oder in Blättchen erhält man es durch Umkristallisieren aus geschmolzenem KCl oder KF.HF. d 2,58 bis 2,60. Fp. 800°. Die Unlöslichkeit des LiF läßt wiederum die Aehnlichkeit des Lithiums mit den Erdalkalien erkennen.

Doppelsalze: BF_3LiF; $SbF_3.LiF$; $SiF_42LiF.2H_2O$ u. a.

Lithiumchlorid LiCl. Durch Auflösen von Li_2CO_3 in HCl oder aus Li_2SO_4 und $BaCl_2$ zu erhalten. Der Eindampfrückstand muß im HCl-Strom erhitzt werden, da sonst das Salz zum Teil hydrolytisch gespalten wird. Fp. 605—607°. Aus wässeriger Lösung scheidet sich oberhalb +12,5° $LiClH_2O$ ab. Beim Verdunsten über H_2SO_4 erhält man unterhalb +10° $LiCl.2H_2O$; es entsteht auch, wenn eine bei 0° gesättigte Lösung mit Kristallen von $LiCl2H_2O$ geimpft wird. Bei sehr tiefen Temperaturen (—25°) bilden sich nadelförmige Kristalle von $LiCl.3H_2O$, die schon bei —15° in das Dihydrat übergehen. Alle diese Salze sind zerfließlich.

100 g Wasser lösen bei

	0°	20°	65°	80°	96°	140°	160°
g LiCl	63,7	80,7	104,2	115	129	139	145

Molekulares Leitvermögen bei 18° in reziproken Ohm

Verdünnung Lit./Mol.	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000	2000	5000	10^4
Λ	63,36	70,71	77,93	82,42	86,12	89,81	92,14	93,92	95,62	96,52	97,19	97,58	98,14

Die durch LiCl erzeugte Gefrierpunktserniedrigung Δ des Wasser läßt sich durch die empirische Gleichung ausdrücken $\Delta = 3{,}6116\,M - 0{,}8857\,M^2$, wenn M die Anzahl Mole pro Liter angibt. Die Gleichung gilt für M = 0,2938 bis 0,02503. Für die Siedepunktserhöhung Δ wurden folgende Werte gefunden:

M :	0,135	0,2584	0,5899	1,050	1,624
Δ :	0,130°	0,245°	0,568°	1,063°	1,743°

Siedepunkt der gesättigten Lösung 168 bis 171 °.

Sowohl die Gefrierpunktserniedrigung als auch die Siedepunktserhöhung übersteigt bei höherer Konzentration den Wert, der sich bei Annahme vollständiger Dissoziation ergeben würde. Diese Erscheinung, die sich auch bei LiBr, LiJ und $LiNO_3$ zeigt, läßt sich durch Annahme von Hydraten in der Lösung erklären.

Wässerige Lösungen von LiCl absorbieren mehr NH_3 als Wasser, was wohl auf die Bildung kathionischer Komplexe $Li(NH_3)_x$ zurückzuführen ist.

Aus wasserfreiem LiCl und trockenem NH_3 entstehen verschiedene wohl definierte Verbindungen und zwar über + 85° LiCl. NH_3; bei 60 bis 85° LiCl.$2NH_3$; bei 18 bis 60° LiCl.$3NH_3$ und unterhalb 13° (rasch bei — 18°) LiCl.$4NH_3$.

Mit vielen aliphatischen und aromatischen Aminen entstehen analog zusammengesetzte Verbindungen.

LiCl löst sich in zahlreichen organischen Flüssigkeiten z. B. in Acetaldehyd, Ameisensäure, Acetonitril, Propionitril usw.; ferner löst

in Prozenten vom Gesamtgewicht der Lösung

Aethylalkohol	bei 25°	2,475 %
Propylalkohol	„ „	3,27 „
Butylalkohol	„ „	9,56 „
Amylalkohol	„ „	8,26 „
Allylalkohol	„ „	4,20 „
Glycerin	„ „	4,15 „
Phenol	„ 53°	1,89 „
Aceton	„ 25°	3,95 „
Pyridin	„ 15°	7,22 „

Aufgelöst in Pyridin oder Aceton, ist LiCl wenig dissoziiert, in den Alkoholen jedoch erheblich, in Ameisensäure fast so stark wie in Wasser.

Doppelsalze: $CuCl_2$.LiCl.$3H_2O$; $MnCl_2$.LiCl.$3H_2O$; $FeCl_2$.LiCl.$3H_2O$; UCl_4. 2LiCl usw.

Lithiumbromid LiBr. Die Darstellungsweise entspricht der beim Chlorid angegebenen. Aus wässeriger Lösung erhält man zerfließliche Hydrate; bei sehr tiefer Temperatur LiBr.$3H_2O$, das bei + 4° in LiBr.$2H_2O$ übergeht. Aus diesem entsteht bei 44° LiBr.H_2O und aus diesem bei 159° LiBr. Fp. des LiBr 547°; d^{17} 3,102.

100 g H_2O lösen bei	0°	34°	54°	82°	103°
g LiBr	143	196	222	244	270

LiBr bildet mit NH_3 folgende Verbindungen: über 95° LiBr.NH_3; bei 87° bis 95° LiBr.$2NH_3$; bei 71,5° bis 87° LiBr. $3NH_3$; bei - 18° LiBr.$4NH_3$.

Doppelsalze: $CuBr_2$2LiBr.$6H_2O$; $SnBr_4$.2LiBr.$6H_2O$ usw.

Lithiumjodid LiJ. Analog darzustellen wie LiCl oder LiBr. Bei Zimmertemperatur kristallisiert aus wässeriger Lösung LiJ.$3H_2O$, das bei 73 ° schmilzt ohne sich zu zersetzen. Durch Erhitzen dieses Salzes erhält man bei 80° das Dihydrat, bei 300° das Monohydrat und über 300° das Anhydrid.

100 g Wasser

lösen bei	0°	19°	40°	59°	75°	80°	99°	120°
gr LiJ	151	164	179	200	263	433	476	588

Lithiumtetrachlorojodid $LiCl_4J.4H_2O$ entsteht in Form gelber, zerfließlicher Nadeln, wenn man in eine heiß gesättigte Lösung von LiCl in verdünnter HCl Jod einträgt, dann mit Chlor sättigt und abkühlt. Andere Polyhaloide des Lithiums wurden nicht dargestellt.

Lithiumrhodanid LiCNS wird aus Li_2CO_3 und wässeriger HCNS hergestellt. Zerfließliche, auch in Alkohol lösliche Blättchen.

Lithiumoxyd Li_2O. Wird Lithium im O-strom auf etwa 200° erhitzt, so entsteht Li_2O, das aber stets durch geringe Mengen von Peroxyd verunreinigt ist. Rein erhält man es durch Erhitzen von reinem LiOH auf 780° im Platinschiffchen im H-strom. Auch durch Erhitzen des Li_2CO_3 auf 780 bis 800°, oder durch Schmelzen des Nitrats im H-strom erhält man reines Oxyd. Es bildet eine weiße, poröse Masse, die sich langsam unter Wärmeentwickelung in Wasser zu LiOH löst. Platin wird selbst bei Rotglut nicht vom Oxyd angegriffen.

Lithiumperoxyd Li_2O_2 bildet sich beim Verbrennen von Lithium im O-strom nur in geringer Menge. Versetzt man eine Lösung von 6,31 g Li_2O in 100 ccm Wasser mit 300 ccm 12 proz. H_2O_2 und 450 ccm Alkohol, so entstehen Kristalle von Li_2O_2. $H_2O_2.3H_2O$, die durch wochenlanges Trocknen über P_2O_5 in Li_2O_2 übergehen.

Lithiumhydroxyd (Lithion) LiOH. Durch Versetzen von Li_2SO_4 mit Barytwasser, durch Lösen von Li_2O in Wasser oder aus Li_2CO_3 und $Ca(OH)_2$ zu erhalten. Beim Verdunsten der Lösung in kohlensäurefreier Luft oder im Vakuum kristallisiert LiOH.H_2O aus, das beim Erhitzen das Hydratwasser abgibt. Fp. 445°. LiOH ist schwach hygroskopisch, es löst sich in Wasser unter Wärmeentwickelung (Hydratationswärme). Die Löslichkeit des

Hydrats steigt sehr wenig mit steigender Temperatur. Aus Leitfähigkeits- und Gefrierpunktsmessungen ergibt sich, daß die OH'-Konzentrationen wässeriger Lösungen fast ebenso groß sind wie die äquivalenter Lösungen von NaOH oder KOH. Lithiumhydroxyd ist also eine starke Base.

Lithiumsulfid Li_2S bildet sich direkt aus Schwefel und Lithium als amorphe gelbe Masse; ist auch durch Reduktion von Li_2SO_4 mit Kohle zu erhalten. Wird amorphes Li_2S im Moissanschen Ofen etwa 3 Minuten durch einen Strom von 1000 Amp. und 50 Volt erhitzt, so entsteht kristallisiertes Li_2S. Kleine durchsichtige Würfel von der d 1,63 bis 1,70. Löslich in Wasser und Alkohol.

Lithiumhydrosulfid LiSH durch Sättigen einer Lösung von Li_2S mit H_2S und Verdunsten neben K_2CO_3 im Vakuum.

Lithiumpolysulfide erhält man beim Schmelzen von LiOH mit Schwefel. Die entstehende gelbe Masse verhält sich wie Schwefelleber.

Lithiumselenid Li_2Se entsteht durch Reduktion von Lithiumselenat mit Kohle oder besser im H-strom. Aus konzentrierter Lösung von LiOH und H_2Se erhält man bei Luftabschluß farblose Prismen von $Li_2Se.9H_2O$, die an der Luft zerfließen und sich sofort zersetzen. Auch die wässerige Lösung zersetzt sich an der Luft sofort unter Abscheidung von Selen.

Lithiumnitrid Li_3N. Man erhitzt Lithium in einem Eisenschiffchen im N-strom auf dunkle Rotglut, es enthält dann 2 bis 8 % Eisen. Lithium absorbiert bereits in der Kälte Stickstoff, wenn dieser nicht absolut trocken ist; das so erhaltene Nitrid ist rotbraun und enthält Lithium. Von Wasser wird es zersetzt. Beim Erwärmen im H-strom nimmt es 5 % Wasserstoff auf. Umgekehrt addiert LiH 51,09 % Stickstoff. Die Zusammensetzung der aus dem Nitrid entstandenen weißen Verbindung ist Li_3NH_2 Trilithiumamid.

Lithiumamid $LiNH_2$. Trocknes Ammoniak wird über geschmolzenes Lithium geleitet und nach der ersten heftigen Reaktion erhitzt man auf 400°. Die weiße krist. Masse zersetzt sich an der Luft bei gewöhnlicher Temperatur nur langsam, rasch beim Erhitzen. Mit warmem Wasser reagiert es heftig $LiNH_2 + H_2O = LiOH + NH_3$.

Lithiumammonium $LiNH_3$? Lithium löst sich in flüssigem Ammoniak zu einer tiefblauen Lösung. Es ist nicht ganz sicher, ob hier eine Verbindung oder eine einfache Lösung des Metalls vorliegt. Bei gewöhnlicher Temperatur, leichter beim Erwärmen auf 60 bis 80° zersetzt es sich in $LiNH_2$ und H_2.

Stickstoffwasserstoffsaures Lithium $LiN_3.H_2O$ entsteht in farblosen Nadeln aus LiOH und N_3H. Hygroskopisch, schwerlöslich in Wasser, löslich in Alkohol.

Lithiumphosphid Li_3P durch direkte Vereinigung der Elemente zu erhalten.

Lithiumarsenid Li_3As. Lithiumarsenat wird mit Kohle reduziert. Kristallisiert dunkelbraun, sehr reaktionsfähig.

Lithiumantimonid Li_3Sb. Man elektrolysiert ein geschmolzenes Gemisch von LiCl und KCl unter Verwendung einer Kohlenanode und einer mit Antimon überzogenen Eisenkathode. Kristallinische, graue, sehr reaktionsfähige Masse. Entsteht auch aus Antimon und in flüssigen NH_3 gelösten Lithium.

Lithiumkarbid Li_2C_2. Ein Gemisch von Li_2CO_3 und Kohle wird im elektrischen Ofen durch einen Strom von 50 Volt und 350 Amp. 10 Minuten erhitzt. Entsteht auch aus den Elementen, wenn das Gemisch im Eisenschiffchen im Vakuum auf dunkle Rotglut erhitzt wird. Bei höherer Temperatur zersetzt sich das Karbid wieder. Auch beim Erhitzen von Lithium im CO- oder CO_2-strom entsteht es. Je nach Darstellungsweise ist das kristallisierte Karbid grau oder durchscheinend. d^{18} 1,65. Es ist ein kräftiges Reduktionsmittel und enthält von allen Karbiden prozentual den meisten Kohlenstoff (63 %). Mit Wasser gibt es Acetylen.

Lithiumsilicid Li_6Si_2. Man erhitzt das in Nickelschiffchen befindliche Gemisch der Elemente im Vakuum und destilliert das überschüssige Lithium bei 400 bis 500° ab. Das reine Silicid ist kristallisiert, hygroskopisch, dunkelviolett gefärbt und sehr reaktionsfähig. Mit konzentrierter HCl entwickelt es selbstentzündliches Si_2H_6.

Lithiumhypochlorit LiClO. Darstellungsweise und Verhalten den übrigen Alkalihypochloriten analog.

Lithiumchlorat $2LiClO_3.H_2O$. Aus Li_2CO_3 und $HClO_3$, oder durch Umsetzung von Li_2SO_4 mit $Ba(ClO_3)_2$ und Verdunsten der Lösung über H_2SO_4 zu erhalten. Zerfließliche, auch in absolutem Alkohol lösliche Oktaeder. Fp. 50°, verliert bei 90° das Kristallwasser. Das Anhydrid schmilzt bei 124°, bei 270° beginnt die Zersetzung. 100 g H_2O lösen bei 18° 315,5 g $LiClO_3$, Dichte dieser Lösung 1,815. Es ist wohl das am leichtesten lösliche anorganische Salz.

Lithiumperchlorat $LiClO_4$. Man neutraliert $HClO_4$ mit Li_2CO_3 oder Li(OH), dampft ab, extrahiert mit Alkohol und läßt kristallisieren. Aus Wasser erhält man zerfließliche hexagonale Nadeln von $LiClO_4.3H_2O$.

Lithiumbromat $LiBrO_3$. Analog dem $LiClO_3$ darzustellen. Aus Wasser kristallisiert $LiBrO_3.H_2O$; aus übersättigten Lösun-

gen $LiBrO_3$. 100 g Wasser lösen bei 18° 153,7 g.

Lithiumjodat $LiJO_3$. Perlmutterglänzende, zerfließliche Kristalle. 100 g Wasser lösen bei 18° 80,3 g.

Lithiumperjodat Li_5JO_6 erhält man durch vollständige Neutralisation von wässeriger Ueberjodsäure mit Li_2CO_3. Bei unvollständiger Neutralisation entsteht $Li_4JO_9.3H_2O$. Aus der Lösung dieses Salzes in wässeriger Ueberjodsäure entsteht das $LiJO_4$.

Lithiumthiosulfat $Li_2S_2O_3.3H_2O$. Aus Li_2SO_4 und BaS_2O_3 als zerfließliche, auch in Alkohol lösliche Nadeln zu erhalten.

Lithiumsulfit $Li_2SO_3.H_2O$ entsteht, wenn SO_2 auf in Wasser suspensiertes Li_2CO_3 einwirkt und die Lösung eingeengt oder mit Alkohol gefällt wird. Aus stark saurer Lösung fällt durch Alkohol $Li_2SO_3.2H_2O$. Doppelsalze: $Li_2SO_3.K_2SO_3.H_2O$; $6Li_2SO_3.Na_2SO_3.6H_2O$.

Lithiumdithionat $Li_2S_2O_6.3H_2O$ ist ein zerfließliches Salz, das aus Li_2SO_4 und BaS_2O_6 erhalten wird.

Lithiumsulfat $Li_2SO_4.H_2O$ scheidet sich in dünnen, monoklinen Tafeln beim langsamen Eindunsten einer aus verdünnter H_2SO_4 und Li_2CO_3 erhaltenen Lösung ab. $d^{20} = 2,02—2,06$. Durch Glühen entsteht daraus Li_2SO_4. Fp. 853 bis 859°.

100 g Wasser lösen bei

	—20°	—5°	0°	20°	40°	60°	80°	100°
g Li_2SO_4	22,5	36	35,5	34,5	32,5	31,5	30	29,5

Nur bei tieferen Temperaturen steigt die Löslichkeit mit steigender Temperatur, bei höheren nimmt sie dagegen ab und bleibt über 100° fast konstant. Wiederum eine Analogie des Lithiums mit dem Calcium. Aequivalent-Leitvermögen = Λ bei 18°; v = Liter/½ Li_2SO_4

v	0,5	1	2	5	10	20	50	100
Λ	30,7	41,4	50,7	60,9	68,1	74,9	82,7	87,4
v	200	500	1000	2000	5000	10 000	∞	
Λ	91	94,7	96,9	98,6	101,1	101,9	101,4 berechnet.	

Saures Lithiumsulfat $LiHSO_4$ soll aus Li_2SO_4 und konzentrierter H_2SO_4 entstehen. Doppelsalze: $NaLiSO_4$; $KLiSO_4$; NH_4LiSO_4; $Na_3Li(SO_4)_2.6H_2O$; $Na_4Li_2(SO_4)_3.9H_2O$. Es existieren dagegen keine isomorphen Mischkristalle.

Lithiumselenit $Li_2SeO_3.H_2O$ kristallisiert bei 60° in seideglänzenden Nadeln. Ferner sind bekannt $LiHSeO_3$ und $LiHSeO_3.H_2SeO_3$.

Lithiumselenat $Li_2SeO_4.H_2O$ wird aus Selensäure und Li_2CO_3 hergestellt. Monokline Tafeln, isomorph mit $Li_2SO_4.H_2O$. Bei höherer Temperatur bekommt man aus der Lösung Li_2SeO_4, isomorph mit Li_2SO_4; es bildet das Doppelsalz $KLiSeO_4$.

Lithiumchromat $Li_2CrO_4.2H_2O$ aus Chromsäure und Li_2CO_3 als rhombische Tafeln zu erhalten.

Lithiummolybdat Li_2MoO_4. Berechnete Mengen von Li_2CO_3 und MoO_3 werden zusammen geschmolzen. Ferner sind dargestellt $2Li_2O.3MoO_3$; $Li_2O.2MoO_3.5H_2O$ u. a.

Lithiumnitrit $2LiNO_2.H_2O$ entsteht aus $Ba(NO_2)_2$ und LiCl, zerfließlich, leichtlöslich in Wasser und Alkohol.

Lithiumnitrat $LiNO_3$. Eine Lösung von Li_2CO_3 in HNO_3 wird eingedampft. Bei 18° entstehen zerfließliche Nadeln von $LiNO_3.3H_2O$; oberhalb 30° $2LiNO_3.H_2O$ und bei 90° $LiNO_3$. Der Umwandlungspunkt $2LiNO_3.H_2O \rightleftarrows LiNO_3$ ist 61°. Die gesättigte Lösung siedet über 200°. Löslichkeit des Trihydrats:

100 g H_2O lösen bei

	0,1°	13,75°	19,05°	29,87°
g $LiNO_3$	53,4	64,7	67,8	129,5

Leitvermögen Λ bei 18°; v = Liter/Mol

v	1	2	5	10	20	50	100
Λ	60,77	67,98	75,01	79,19	82,72	86,41	88,61
v	200	500	1000	2000	5000	10 000	
Λ	90,33	91,97	92,87	93,52	94,15	94,46	

Die elektrische Leitfähigkeit in Methylalkohol gelösten Nitrates ist bei großer Verdünnung größer als in reinem Wasser. In Gemischen von Methyl- oder Aethylalkohol mit Wasser ist die Leitfähigkeit am geringsten bei einem Gehalt von 50% Alkohol. Zersetzungspotential einer normalen Lösung = 2,11 Volt.

Lithiumhypophosphit $LiH_2PO_2.H_2O$, farblose, zerfließliche, monokline Kristalle, die aus Bariumhypophosphit und Li_2SO_4 hergestellt werden.

Lithiumhypophosphat $Li_4P_2O_6.7H_2O$ erhält man durch Vermischen von $Na_4P_2O_6$ mit LiCl im Verhältnis 1: 2. Wenig löslich in Wasser.

Lithiumorthophosphat (tertiäres) Li_3PO_4 entsteht als weißer, schwerer, kristallinischer Niederschlag beim Kochen von LiCl mit Na_2HPO_4. Zur vollständigen Abscheidung wird die Lösung mit NaOH neutralisiert. Das Salz schmilzt nicht beim Glühen. Aus geschmolzenem Kaliumphosphat umkristallisiert, erhält man orthorhombische Prismen; aus geschmolzenem LiCl entstehen beim Lösen in Wasser tafelförmige, rhomboidale Kristalle. d^{15} 2,41. Ein Dilithiumphosphat existiert nicht.

Monolithiumphosphat LiH_2PO_4 erhält man, wenn Li_2CO_3 in Phosphorsäure gelöst und die vom Niederschlag abfiltrierte Lösung eingedampft wird. Bei stärkerem Erhitzen entsteht daraus $LiPO_3$.

Lithiumpyrophosphat $Li_4P_2O_7.2H_2O$. Man löst den aus LiCl und $Na_4P_2O_7$ entstehenden, stets Na-haltigen Niederschlag, in Essigsäure und fällt mit Alkohol.

Lithiummetaphosphat $LiPO_3$ scheidet sich als schweres weißes Kristallpulver aus, wenn Li_2CO_3 mit überschüssiger Phosphorsäure so weit erhitzt wird, bis weiße Dämpfe von H_3PO_4 entweichen. Wenig löslich in Wasser. Bei beginnender Rotglut entsteht daraus glasiges Lithiummetaphosphat, das zerfließlich und in Wasser löslich ist. Kristallinisches Lithiummetaphosphat gibt folgende Doppelsalze: $Li(NH_4)_2(PO_3)_3.4H_2O$; $LiK_2(PO_3)_3.2H_2O$; $NH_4Li_4(PO_3)_5$.

Lithiumarsenat $2Li_3AsO_4.H_2O$ bildet sich beim Lösen von Li_2CO_3 in Arsensäure auf Zusatz von NH_3 als kristallinisches Pulver. Wird das Salz in Arsensäure gelöst, so erhält man beim Verdunsten zerfließliche rhombische Prismen von Monolithiumarsenat $2LiH_2AsO_4.3H_2O$.

Lithiumantimonat $LiSbO_3.3H_2O$ fällt aus Lithiumsalzlösungen auf Zusatz von Kaliumantimonat als mikroskopische hexagonale Täfelchen.

Lithiumkarbonat Li_2CO_3. Wird am besten durch Kochen von Lithiumsalzlösungen mit $(NH_4)_2CO_3$ hergestellt, weil sich die Ammonsalze leichter auswaschen lassen als Kalium- oder Natriumsalze, Li_2CO_3 ist das Ausgangsmaterial zur Darstellung von reinen Lithiumsalzen, weil es selbst leicht zu reinigen ist entweder durch wiederholtes Lösen und Fällen oder dadurch, daß man es in Wasser suspendiert und durch Einleiten von CO_2 in lösliches $LiHCO_3$ überführt. Beim Kochen dieser Lösung scheidet sich Li_2CO_3 wieder ab.

100 g H_2O lösen bei	0°	10°	20°	50°	75	100°
g Li_2CO_3	1,54	1,41	1,33	1,188	0,87	0,733

Durch Zusatz von Salzen, besonders von Ammonsalzen, wird die Löslichkeit erheblich größer.

Während Kalium- und Natriumkarbonat sich beim Erhitzen nicht zersetzen, gibt Li_2CO_3 leicht CO_2 ab und zeigt dadurch Aehnlichkeit mit dem $CaCO_3$. Im Vakuum kann man alle CO_2 austreiben, doch verdampft dabei das entstandene Oxyd zum größten Teil.

Lithiumformiat $LiO_2CH.H_2O$ kristallisiert in kleinen Nadeln oder großen rhombischen Prismen, leicht löslich in Wasser. Ein Diformiat ist nicht bekannt.

Lithiumacetat $LiC_2H_3O_2.2H_2O$ ist leichtlöslich in Wasser. Auch ein Diacetat $LiC_2H_3O_2.C_2H_4O_2$ ist bekannt.

Lithiumoxalat $Li_2C_2O_4$. Kristallwarzen, löslich in Wasser, unlöslich in Alkohol.

Saures Lithiumoxalat $LiHC_2O_4$ unlöslich in kaltem Wasser, leichtlöslich in heißem.

Lithiumtartrat $Li_2C_4H_4O_6$ sehr leichtlöslich in Wasser $[\alpha]_D^{20} = +35,84°$ (8,305 g in 100 ccm) Lösung. Es existieren nur Salze der d-Weinsäure.

Lithiumurat $LiH_3C_5N_4O_3$ ist das löslichste harnsaure Salz. 1 Teil löst sich bei 20° in 367,8 Teilen Wasser; bei 39° in 115,8; bei 100° in 39.

Lithiumsilikate. Durch Zusammenschmelzen von LiCl mit SiO_2 kann man erhalten Li_4SiO_4; Li_2SiO_3 und $Li_2Si_5O_{11}$. In wässeriger Lösung sind diese Salze stark hydrolysiert.

Lithiumborat $LiBO_2.8H_2O$, das aus Borsäure und LiOH hergestellt wird, ist wahrscheinlich ein Orthoborat LiH_2BO_3 $7H_2O$, weil bei 110° nur 7 Mole Wasser entweichen; das letzte entweicht erst bei 160°. Dünne hexagonale Tafeln.

100 g H_2O lösen bei	0°	15°	31,5°	37,5°	45°	47°
g $LiBO_2$	0,7	1,91	5,28	9,1	20	34,7

Bei 47° schmilzt es im Kristallwasser zu einer homogenen Flüssigkeit.

Lithiummetaborat $LiBO_2$ entsteht aus Lithiumalkoholat und alkoholischer Borsäure.

6. Thermochemie. Für die Neutralisationswärme des LiOH durch HCl wurde gefunden:

$LiOH_{gel.} + HCl_{gel.} = LiCl_{gel} + 13,85$ Cal (I)

woraus hervorgeht, daß das LiOH eine starke Base ist.

Bei der Auflösung von metallischem Lithium in Wasser wird Wärme entwickelt:

$Li_{fest} + nH_2O = LiOH_{gel.} + 53,2$ Cal. (II)

Da nun die Bildungswärme der Salzsäure

$H_{gasf.} + Cl_{gasf.} + nH_2O = HCl_{gel.} + 39,32$ Cal. (III),

so folgt aus I, II und III

$Li_{fest} + Cl_{gasf.} + n\ H_2O = LiCl_{gel.} + 106,37$ Cal.

Unter Berücksichtigung der Lösungswärme des LiCl

$LiCl_{fest} + nH_2O = LiCl_{gel} + 8,44$ Cal.

ergibt sich für die Bildungswärme aus den Elementen

$Li_{fest} + Cl_{gasf.} = LiCl_{fest} + 97,93$ Cal.

Auf ähnliche Weise findet man

$Li_{fest} + Br_{fl.} = LiBr_{fest} + 84,1$ Cal.

$Li_{fest} + J_{fest} = LiJ_{fest}$ 65,2 Cal.

Die Bildungswärme des Lithiumoxydes

aus den Elementen berechnet sich folgendermaßen

$Li_2O_{fest} + nH_2O = 2LiOH_{gel} + 31,20$ Cal.

$H_{2\,gasf.} + O_{gasf.} = H_2O_{fl.} + 68,5$ Cal.

In Verbindung mit II ergibt sich dann

$2\,Li_{fest} + O_{gasf.} = Li_2\,O_{fest} + 143,7$ Cal.

Interessant ist es, daß die Bildungswärme des Lithiumperoxydes aus Lithiumoxyd und Sauerstoff sowohl als auch aus den Elementen erheblich größer ist als die Bildungswärmen der anderen Alkaliperoxyde, daß sie dagegen die Bildungswärme des Calciumperoxydes nur sehr wenig übertrifft. Zum Vergleich seien angeführt:

$Li_{2\,fest} + O_{2\,gasf.} = Li_2O_{2\,fest} + 152,65$ Cal.

$Na_{2\,fest} + O_{2\,gasf.} = Na_2O_{2\,fest} + 117,70$,,

$Ca_{fest} + O_{2\,gasf.} = CaO_{2\,fest} + 150,43$,,

Auch hier zeigt sich wieder die große Aehnlichkeit des Lithiums mit den Erdalkalien.

7. Photochemie. Lithiumsalze färben die Flamme karmoisinrot, die Färbung wird durch kleinere Mengen Kaliumsalz nicht beeinflußt, viel Natriumsalze verdecken sie. Das Spektrum der Lithiumsalze zeigt zwei charakteristische Linien, eine intensive rote (Li α) und eine schwächere orange (Li β). Das Linienspektrum des Lithiums kann in Flammen, Bogen, Funken und in Vakuumröhren erhalten werden. Im Gegensatz zu den anderen Alkalien sind die Unterschiede bei verschiedener Herstellungsweise der Spektra nur quantitativer Art.

Spektrallinien des L. (Bunsenflamme): 6708, 6103, 4972, 4602, 4273, 4132, 3915, 3794, 3232, 2741, 2362.

Bei okularer Beobachtung ist die rote Linie (6708) die empfindlichste Probe.

Nachweisbare Mengen in Bruchteilen von Milligrammen:

Metall	Chlorid	Bromid	Jodid	Nitrat	Sulfat
$^1/_{1\,000\,000}$	$^1/_{800\,000}$	$^1/_{600\,000}$	$^1/_{500\,000}$	$^1/_{500\,000}$	$^1/_{400\,000}$

Bei photographischer Beobachtung ist die Linie $\lambda = 4602$ die empfindlichste. Die Reaktion auf Li im Funkenspektrum ist empfindlicher.

Im Bogenspektrum tritt im Ultrarot, wie bei den anderen Alkalien, einen Linienserie auf, die in der Flamme zu fehlen scheint.

Die Umkehrungserscheinungen sind an den Linien des Lithiums wiederholt untersucht worden und unter Umständen sehr kompliziert.

Das Vorkommen von Lithiumlinien in der Sonne ist nicht sicher nachgewiesen. Die Knallgasflamme ist besonders zur Untersuchung von Mineralien auf Lithium geeignet.

K o l l o i d a l e s L i t h i u m. Durch elektrische Zerstäubung von Lithium in absolut reinem und trockenem Aethyläther entsteht ein A e t h y l ä t h e r o s o l d e s L i t h i u m s. Wegen der großen Oxydierbarkeit des Metalls geschieht die Darstellung am besten in einer Wasserstoffatmosphäre.

Während nun die Farbe der Aetherosole der anderen Alkalimetalle mit steigenden Atomgewicht von purpur-violett zu blaugrün übergeht, ist die Farbe des Lithiumätherosols b r a u n und gleicht der des Magnesiums.

Literatur. ***Arfvedson*** *Schweiggers Journ. 22 93 u. 24 214, Annales de Chim. et Phys. (2) 10 82. —* ***Bunsen und Matthiessen*** *Liebigs Ann. 94 107 1855. —* ***Rammelsberg*** *Pogg. Ann. 66 79 1845 u. 128 311 1866. —* ***Troost*** *Annales de Chim. et Phys. (3) 51 103.*

J. Gewecke.

b) Natrium.

Na, Atomgewicht 23,00.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung. 5. Chemische und physikalische Eigenschaften. 6. Elektrochemie. 7. Analytische Chemie. 8. Kolloidchemie. 9. Reaktionen des Natriums. 10. Verwendung des Natriums. 11. Verbindungen des Natriums.

1. Atomgewicht des Elementes. Das Atomgewicht des Natriums beträgt nach den grundlegenden Untersuchungen von R i c h a r d s und W e l l s (NaCl : AgCl, NaCl : Ag, NaBr : AgBr) 23,00. Der Wert paßt gut in das periodische System der Elemente und entspricht der aus der Atomwärme nach D u l o n g und P e t i t berechneten Zahl.

2. Vorkommen. Das Natrium gehört zu den in der Natur meist verbreiteten Elementen. Im freien Zustande kommt es freilich nicht vor, da es an der Luft sogleich in Oxyd oder Karbonat umgewandelt wird. Dagegen läßt es sich in fast allen Mineralien nachweisen. Mächtige Lager bildet das Steinsalz, die durch Verdunsten von Meerwasser entstanden sind, ferner der Natronsalpeter (in Chile) und der Kryolith, ein Natrium-Aluminiumfluorid in Grönland. Im Meerwasser sind 2,6 bis 2,9 % NaCl enthalten.

3. Geschichte. Am längsten bekannt ist wohl Soda und Kochsalz. Doch unterschied man lange Zeit hindurch die Soda nicht von der Pottasche, dem entsprechenden Kaliumsalz. D u h a m e l d e M o n c e a u unterschied zuerst 1736 zwischen beiden Alkalien als „alcali minerale“, dem Natriumsalz als Steinsalz, und „alcali vegetabile“, dem kohlensauren Kali aus Pflanzenasche. M a r g g r a f beobachtete die verschiedenen Flammenfärbungen beider Elemente. D a v y stellte als erster die Elemente durch Elektrolyse der geschmolzenen Hydroxyde in reinem Zustande im Jahre 1807 dar.

4. Darstellung des Metalles. Während früher meist rein chemische Verfahren zur Darstellung des Natriums Verwendung fanden, ist man heutzutage mehr und mehr zu elektrolytischen Methoden übergegangen.

Nach Castner elektrolysiert man Natriumhydroxyd bei einer den Schmelzpunkt der Verbindung nur um 20° übersteigenden Temperatur und schöpft das wegen seines geringen spezifischen Gewichtes an die Oberfläche steigende Natrium mit einem durchlöcherten eisernen Löffel ab, der das geschmolzene Aetznatron, aber nicht das Metall hindurchläßt. Eine Reihe von Verfahren geht vom Chlornatrium aus, jedoch ist hier die Gewinnung infolge von Nebenreaktionen schwieriger durchzuführen.

Die chemischen Methoden gründen sich auf die Reduktion des Hydroxydes durch Kohle, Eisen bzw. Eisenkarbid oder Calciumkarbid. Das metallische Natrium wird abdestilliert und in geeigneten Formen, ev. direkt unter Petroleum aufgefangen.

5. Chemische und physikalische Eigenschaften des Natriums. Das Metall zeigt an frischen Schnittflächen silberweißen Glanz. An der Luft läuft es durch Bildung einer Oxydschicht sofort an. Als Kristallform treten gewöhnlich Würfel auf, unter besonderen Umständen wurden auch Oktaeder des quadratischen Systems beobachtet.

Der Schmelzpunkt liegt bei 97,6°, er wird durch den Druck stark erhöht. Der Siedepunkt wird zu 877,5° angegeben. Bei gewöhnlicher Temperatur läßt sich das Metall mit den Fingern zusammendrücken, bei —20° ist es fest. Die in der Literatur mitgeteilten Bestimmungen der Dampfdichte des Elementes sind nicht beweiskräftig, da der Natriumdampf alle bisher dazu benutzten Gefäßmaterialien angreift. Durch Messung der Schmelzpunktserniedrigung ergab sich in Quecksilber und Cadmium einfache Atomgröße.

Die spezifische Wärme des Elementes ergab sich zwischen —34 und +7° zu 0,2943. Hieraus berechnet sich die Atomwärme 6,65. Die latente Schmelzwärme beträgt 31,7 Cal. für 1 g oder 730 Cal. für ein Grammatom. Die Schmelzpunkterniedrigung von 100 g Natrium durch 1 Mol. gelösten Metalls berechnet sich hieraus zu 86 °.

Das Metall ist ein guter Leiter für Wärme und Elektrizität. Die Wärmeleitfähigkeit bei 0° ist etwa $^1/_3$ von der des Silbers. Die elektrische Leitfähigkeit beträgt bei 21,7° $22{,}4 . 10^4$ rez. Ohm. Das Leitvermögen nimmt mit steigender Temperatur ab. Beim Schmelzpunkte tritt ein Knick in der Kurve auf.

Das spezifische Gewicht ergibt sich im Mittel zu 0,978, das Atomvolumen demnach zu 23,7. Der Ausdehnungskoeffizient wurde zu 0,000073 bestimmt, der Wert übertrifft den aller anderen Metalle.

6. Elektrochemie des Natriums. Das Natrium ist einwertig. Es ist durch besonders große Ionisierungsfähigkeit ausgezeichnet, so daß der Uebergang aus dem elementaren in den Ionenzustand viel leichter vor sich geht als der umgekehrte Vorgang. Dementsprechend zeigt 1 Grammäquivalent des Elementes die auffällig große Ionisierungswärme von + 57400 cal. Die Elektroaffinität des Natriums läßt sich zu etwa 2,8 Volt gegen den Wasserstoff-Nullpunkt berechnen. Natrium ist also ein sehr unedles Metall. Es bildet ausschließlich einwertige Ionen, die sehr beständig sind. Neigung zur Komplexbildung ist dementsprechend äußerst gering. Die hohe Ionisierungstendenz bedingt andererseits die leichte Löslichkeit aller Verbindungen des Elementes.

Weitaus die meisten Verbindungen des Natriums sind in wässeriger Lösung in hohem Maße dissoziiert. Sie gehören zu den starken Elektrolyten, gehorchen also dem Ostwaldschen Verdünnungsgesetze nicht.

Die elektrolytische Beweglichkeit des Na-Ions wird für unendliche Verdünnung bei 18° zu 43,5 berechnet.

Die Salze des Natriums mit schwachen Säuren sind weitgehend hydrolysiert, reagieren also stark alkalisch.

Das Natriumion ist farblos, nur die Salze mit gefärbten Anionen sind in Lösung wie im festen Zustande gefärbt.

7. Analytischer Nachweis des Natriums. Der Nachweis des Elementes ist durch die große Löslichkeit seiner Verbindungen sehr erschwert. Die qualitative Erkennung erfolgt am leichtesten durch die gelbe Färbung, welche der Bunsenflamme durch Natriumverbindungen erteilt wird. Das Emissionsspektrum besteht aus einer doppelten Linie im Gelb (λ = 589,6 und 589,2). Der Nachweis des Natriums durch die Flammenfärbung ist äußerst empfindlich. Noch $3 . 10^{-10}$ g sind auf diese Weise zu erkennen.

Von schwerlöslichen Salzen sei das Pyroantimoniat $Na_2H_2Sb_2O_7$ genannt, von dem ein Teil in 350 Teilen Wasser von 100° löslich ist. Das Kieselfluornatrium ist in einem Gemische gleicher Raumteile Wasser und Alkokol fast unslöslich.

Die quantitative Bestimmung erfolgt zweckmäßig als Sulfat oder Chlorid. In der Regel wird es mit dem Kalium zusammen gewogen. Man ermittelt die Einzelbestandteile, indem man entweder das Kalium als Platinchloriddoppelsalz abscheidet und in Abzug bringt, oder indem man auf indirektem Wege durch Bestimmung des gemeinsamen Anions den Gehalt an beiden Elementen berechnet.

8. Kolloidchemie des Natriums. Kolloidale Lösungen der Alkalimetalle hat Svedberg in organischen Flüssigkeiten durch elektrische Zerstäubung erzeugt. Die Lösung des Natriums in Aether ist purpurn, violett

bis blau gefärbt, ebenso wie auch Natriumdampf purpurne Farbe besitzt. Die Feststellung der Farbe des kolloidalen Natriums ist von Interesse für die Erklärung des sogenannten blauen Steinsalzes, von dem weiter unten die Rede sein wird.

9. Reaktionen des Natriums. Das Natrium gehört wie auch die übrigen Alkalimetalle zu den reaktionsfähigsten Elementen. Jedoch treten Reaktionen nur ein, wenn gleichzeitig Feuchtigkeit vorhanden ist. Von trockenen Stoffen wird es dagegen nicht angegriffen, nicht einmal von Sauerstoff und den Halogenen. Dagegen reagiert es mit feuchten Stoffen äußerst heftig, zum Teil unter Feuererscheinung. Mit Wasser setzt es sich um entsprechend der Gleichung $2Na + H_2O = 2NaOH + H_2$. Hierbei schwimmt das Metall in kreisenden Bewegungen auf der Oberfläche des Wassers. Entzündung des Wasserstoffes tritt aber nur ein, wenn entweder von vornherein heißes Wasser verwendet wurde oder die Bewegung des Metallkügelchens künstlich, etwa durch Unterlegen von etwas Filtrierpapier, gehemmt wird.

10. Verwendung des Natriums. Das Metall findet in der Technik in erster Linie Anwendung zur Herstellung von Natriumsuperoxyd (z. B. für Waschmittel), ferner von Natriumamid für die Indigofabrikation, von Cyannatrium und zu organischen Synthesen. Im Laboratorium benutzt man es hauptsächlich zur Gewinnung reiner Natronlauge und als Reduktionsmittel bei Gegenwart von Alkohol oder als Amalgam.

11. Verbindungen des Natriums. Natriumhydride. Von Wasserstoffverbindungen des Elementes sind die beiden den Formeln Na_2H und NaH entsprechenden beschrieben. Ersteres dissoziiert leicht in seine Bestandteile. Das Hydrid NaH wurde von Moissan in Form weißer Kristalle gewonnen. Es wirkt stark reduzierend. Beim Erhitzen in Vakuum zersetzt es sich quantitativ in seine Bestandteile.

Natriumfluorid NaF. Das Salz wird aus Flußsäure und Natriumkarbonat oder Hydroxyd, besser durch Schmelzen von Kryolith (Natrium-Aluminiumfluorid) mit Natriumhydroxyd dargestellt nach der Gleichung $Na_3AlF_6 + 6NaOH = 6NaF + Al(ONa)_3 + 3H_2O$. Das schwerer lösliche Natriumfluorid bleibt beim Auslaugen zurück, während das Aluminat leicht in Lösung geht. Das farblose Salz schmilzt bei 980°. In 100 Teilen Wasser lösen sich bei Zimmerwärme etwa 4 Teile des Salzes. Mit der Temperatur steigt die Löslichkeit nur wenig an. In einfach normaler Lösung ist die Verbindung zu etwa 58 % elektrolytisch dissoziiert. In $^1/_{10000}$ normaler Lösung beträgt der Dissoziationsgrad 99,1.

Natriumchlorid NaCl. Das Chlornatrium findet sich in ungeheuren Mengen in der Natur. Meerwasser enthält es durchschnittlich zu etwa 2,7 %, Salzseen und Solen in noch viel höherem Maße. In festem Zustande findet es sich in gewaltigen durch Verdunsten von Meerwasser entstandenen Salzlagern als Steinsalz neben einer Reihe anderer Salze. Erwähnt sei das Staßfurter Salzlager, ferner Wieliczka in Galizien und Berchtesgaden in Bayern. Die Gewinnung erfolgt bergmännisch oder durch Auslaugen mittels Bohrlöchern. Zur Konzentration schwächerer Salzsolen benutzt man auch heute noch Gradierwerke. Die Sole wird hinaufgepumpt und rieselt an großen Flächen von Schwarzdorn herunter. Die Flüssigkeit verdampft während des Herunterrieselns zum großen Teil, die unten anlangende konzentrierte Lauge wird nach Abscheidung der schwerer löslichen Salze eingedampft.

Auch aus dem Meerwasser kann das Salz gewonnen werden. Die aus der Ostsee erhaltene feste Salzmasse besteht zu etwa 85 % aus Kochsalz und enthält ferner etwa 10 % Chlormagnesium und etwa 5 % schwefelsaurer Magnesia neben kleinen Mengen von Gips, kohlensaurem Kalk und kohlensaurer Magnesia.

Von Interesse ist eine in Salzlagern häufiger vorkommende blaue Form des Steinsalzes. Man hat die blaue Farbe auf die Gegenwart von Subchlorid, ferner von kolloidal gelöstem Natriummetall oder auf rein physikalische Ursachen zurückgeführt. Bemerkenswert ist, daß auch unter dem Einfluß von Kathodenstrahlen farbloses Steinsalz die gleiche blaue Farbe annimmt. Auch beim Erhitzen in Natriumdampf treten ähnliche Färbungen auf. Die Frage kann zurzeit noch nicht als gelöst gelten.

Das Chlornatrium kristallisiert gewöhnlich in farblosen Würfeln, die meist zu hohlen Pyramiden mit treppenförmigen Wänden zusammentreten. Der Schmelzpunkt wird um 800° herum angegeben. Die Molekulargröße des Dampfes wurde durch unmittelbare Dampfdichtebestimmung der Formel NaCl entsprechend gefunden. Die Dichte des Salzes beträgt etwa 2,1. Als spezifische Wärme wird für das geschmolzene Salz 0,213 bis 0,214 angegeben. Die Löslichkeit des Salzes steigt mit der Temperatur entsprechend seiner geringen Lösungswärme von —1,2 Cal. nur in geringem Grade an. 100 g Wasser lösen bei 0° 35,6 g, bei 100° 39,1 g NaCl. Der Siedepunkt der gesättigten Lösung liegt bei 107,7°, die Lösung enthält dann 39,65 g NaCl in 100 g Wasser. Bei Temperaturen unter 0° ist ein 2-Hydrat des Salzes stabil, der eutektische Punkt für das System Dihydrat, Eis und gesättigte Lösung liegt bei —21,2°.

Die Bildungswärme des festen Kochsalzes

aus den Elementen wurde zu 97,7 Cal. ermittelt. Die Neutralisationswärme von einem Aequivalent wässeriger Natronlauge mit einem Aequivalent wässeriger Salzsäure wurde wie bei allen starken Säuren und Basen zu 13,745 Cal. (Wert der Bildungswärme des Wassers aus den Ionen) gefunden. Aus Leitfähigkeitsmessungen ergibt sich für die einfach normale Lösung ein Dissoziationsgrad von 68,2, für die $^1/_{10000}$ normale Lösung von 99,2 %. Die Dissoziation nimmt mit steigender Temperatur ab.

Von außerordentlicher technischer Bedeutung ist die elektrolytische Zersetzung von Chlornatriumlösung, da hierbei unmittelbar die technisch wichtigen Produkte Chlor und Natronlauge erhalten werden. Um sekundäre Einwirkungen der Reaktionsprodukte aufeinander (Bildung von Hypochlorit oder Chlorat) zu vermeiden, müssen die Zersetzungsprodukte voneinander getrennt werden. Dies geschieht am einfachsten durch die Anwendung von Diaphragmen, die aber aus einem von Sauerstoff und Chlor schwer angreifbaren Material bestehen müssen. In der Praxis haben sich außer dem Diaphragmenverfahren noch das Quecksilberverfahren und das Glockenverfahren eingebürgert.

Bei ersterem befindet sich Quecksilber auf dem Boden der Zelle als zusammenhängende Schicht, während die darüberstehende Flüssigkeit durch eine in das Quecksilber tauchende feste Scheidewand in zwei Teile getrennt wird. Auf der einen Seite taucht eine Kohlenanode in Kochsalzlösung, auf der anderen eine Eisenkathode in reines Wasser. Das Quecksilber, das auf der ersten Seite die Rolle der Kathode spielt, wird in Bewegung gehalten und gibt an der anderen Seite das abgeschiedene Natrium als Natronlauge an das Wasser ab.

Bei dem Glockenverfahren sind Kathode und Anode außerhalb und innerhalb einer unten offenen Glocke angeordnet. Das innerhalb der Glocke entstehende Chlor wird oben abgeleitet, die außerhalb gebildete Natronlauge wird durch eine neutrale Schicht von der Chlornatriumlösung, auf der sie schwimmt, getrennt.

Das Kochsalz findet als Zusatzstoff zur Nahrung, ferner als Ausgangsprodukt zur Herstellung von Soda, Chlor und Chlorverbindungen, Aetznatron und schwefelsaurem Natron Verwendung. Ferner wird es zum Glasieren von Tonwaren benutzt sowie bei der Metallgewinnung (Silber und Kupfer), in der Seifen- und Alaunindustrie und als Konservierungsmittel in der Gerberei. Im Laboratorium benutzt man es u. a. zur Herstellung von Kältemischungen.

Der Salzverbrauch betrug in Deutschland im Jahre 1906 1 346 211 t, wovon etwa $^2/_3$ in der Technik, $^1/_3$ zu Speisezwecken verwandt wurden.

Das Chlornatrium ist das einzige anorganische Salz, das als Zusatz zur menschlichen Nahrung unentbehrlich ist. Die erforderliche Menge ist nicht mit Sicherheit bekannt, auch dürfte die Zahl je nach der Art der Nahrung erheblichen Schwankungen unterliegen. Festzustehen scheint, daß der Kochsalzbedarf um so größer ist, je kalireicher die Nahrung ist, er ist am größten bei reiner Pflanzennahrung. In Zusammenhang hiermit dürfte der uralte Opferbrauch stehen, Fleischopfer ohne, Pflanzenopfer mit Salz darzubringen.

Um für Steuerzwecke das nicht zur Nahrung verwandte Salz kenntlich zu machen, wird es denaturiert, d. h. durch Zusätze zur Nahrung unbrauchbar gemacht. Als Denaturierungsmittel dient z. B. Eisenoxyd („Viehsalz").

Natriumbromid NaBr. Man gewinnt das Salz durch Neutralisation von Bromwasserstoffsäure mit Natronlauge oder Soda. Es bildet weiße Kristalle des rhombischen Systems, die salzig schmecken und neutral reagieren. Die Verbindung schmilzt bei etwa 760°. Die bei gewöhnlicher Temperatur stabile Form des Salzes enthält zwei Moleküle Kristallwasser und besitzt das spezifische Gewicht 2,176, während das oberhalb 50,7° beständige wasserfreie Salz das spezifische Gewicht 3,014 aufweist. Bei —24° geht das 2-Hydrat in ein 5-Hydrat über, der eutektische Punkt für letzteres und Eis liegt bei —28°. Die Löslichkeit des Bromides ist merklich größer als die des Chlorides. Sie beträgt bei 20° 90,3, bei 100° 120,5 g Bromnatrium in 100 g Wasser. Die Bildungswärme des Salzes aus den Elementen beträgt 85,7 Cal.

Jodnatrium NaJ. Die Gewinnung des Salzes entspricht der des Bromides. Auch hier ist bei gewöhnlicher Temperatur das monokline 2-Hydrat die stabile Form, die mit den entsprechenden Chlor- und Bromverbindungen isomorph ist. Der Schmelzpunkt wird von 603 bis 695° angegeben. Beim Vergleich der drei bisher besprochenen Halogenverbindungen des Natriums zeigt sich, daß mit steigendem Atomgewicht des Halogens der Schmelzpunkt der Verbindung sinkt. Dies ist auch bei den übrigen Alkalimetallen der Fall. Von Hydraten des Jodids besteht ebenso wie beim Bromid außer anhydrischem Salz (oberhalb 65°) und Dihydrat noch ein unterhalb —13,5° beständigeres 5-Hydrat, dessen eutektischer Punkt mit Eis zu —31,5° festgestellt wurde. Die Löslichkeit der Verbindung ist noch erheblich größer als beim Bromid. Sie beträgt bei 20° 179, bei 100° 302 g NaJ in 100 g Wasser. Der Siedepunkt der gesättigten Lösung liegt

bei 141° und einem Gehalte von mehr als 330 g NaJ in 100 g Wasser. Die Bildungswärme der Verbindung aus den Elementen wurde zu 69,1 Cal. bestimmt.

Natriumcyanid NaCN. Das Salz wird gewöhnlich aus Ferrocyannatrium in ähnlicher Weise gewonnen, wie bei der Kaliumverbindung beschrieben. Die farblosen Kristalle reagieren in wässeriger Lösung infolge von Hydrolyse deutlich alkalisch, während die gleichzeitig gebildete undissoziierte Blausäure sich durch ihren Geruch zu erkennen gibt. In $^1/_{10}$ normaler Lösung berechnet sich ein Hydrolysengrad von 0,96 %. Die Bildungswärme aus den Elementen beträgt 23 Cal., die Neutralisationswärme 2,8 bis 2,9 Cal. Der erheblich niedrigere Wert als im Falle der starken Säuren ist durch die geringe Stärke der Blausäure bedingt, die erst während der Neutralisation unter starkem Wärmeverbrauch ionisiert wird.

Natriumsulfocyanid NaCNS. Das Rhodanid, das z. B. durch Umsetzung von Rodanammonium mit Soda gewonnen wird, kristallisiert in wasserfreien, sehr zerfließlichen Tafeln. Die Bildungswärme beträgt 39,2 Cal.

Natriumhydroxyd NaOH. Eine Lösung der Verbindung, gewöhnlich als Natronlauge bezeichnet, erhält man durch Eintragen von metallischem Natrium in reines Wasser. Die Verfahren, die auf der Elektrolyse von Chlornatrium beruhen, sind bereits bei diesem besprochen. Technisch wird es zum größten Teil durch Erhitzen von Sodalösung mit gelöschtem Kalk gewonnen („Kaustifizierung" der Soda). Der scheinbar äußerst einfache Vorgang: $Na_2CO_3 + Ca(OH)_2 = 2\,NaOH + CaCO_3$, ist in Wahrheit ziemlich verwickelt. Hierbei wirken die unvollständige Dissoziation des Calciumhydroxydes, die Hydrolyse des kohlensauren Kalkes und die Möglichkeit der Bildung verschiedener Doppelsalze zwischen Calciumkarbonat und Natriumkarbonat mit. Das feste Natriumhydroxyd wird durch Eindampfen der wässerigen Lösung hergestellt. In der Regel kommt es in Stangen gegossen in den Handel.

Das Natriumhydroxyd bildet eine weiße, hygroskopische Masse vom spezifischen Gewicht 2,130. Es schmilzt bei Rotglut und verdampft bei höheren Wärmegraden ohne Zersetzung. Durch den elektrischen Strom wird die geschmolzene Verbindung unter Abscheidung von metallischem Natrium zerlegt. An der Luft zerfließt es, wird aber mit der Zeit durch Bildung des Karbonates wieder fest. Die Bildungswärme aus den Elementen wurde für festes Aetznatron zu 101,9, in Lösung zu 111,8 Cal. ermittelt.

In Wasser löst es sich zu einer stark alkalischen Flüssigkeit, aus der je nach der Temperatur eine ganze Reihe von Hydraten mit 1 bis 7 Molekülen Kristallwasser erhalten werden kann. Der eutektische Punkt für 7-Hydrat und Eis liegt bei —28°.

Die Natronlauge ist der typische Vertreter der starken Basen. Die basischen Reaktionen sind durch die Gegenwart der Hydroxylionen bedingt. Die einfach normale Lösung ist bereits zu etwa 70 %, die $^1/_{10}$ normale zu 90% dissoziiert.

Natriumhydroxyd findet in der Industrie und im Laboratorium vielfache Verwendung. Von technischen Anwendungen sei besonders seine Benutzung in der Seifenindustrie hervorgehoben.

Natriumoxyd Na_2O. Das Oxyd wird neben Superoxyd bei der Verbrennung von metallischem Natrium an trockener Luft oder bei der Einwirkung von Natrium auf das Hydroxyd oder Superoxyd gewonnen. Es bildet eine weiße Masse, die bei Rotglut schmilzt, das spezifische Gewicht 2,3 besitzt und stark hygroskopisch ist. Mit Wasser reagiert es unter starker Wärmeentwickelung (56,5 Cal.).

Natriumsuperoxyd Na_2O_2. Im großen wird das Peroxyd durch Erhitzen von metallischem Natrium in eisernen Röhren auf 300° unter Hindurchleiten von trockener Luft gewonnen. Die Wirkungen der Verbindung entsprechen denen des Wasserstoffsuperoxyds. Es bildet ein weißes, leicht gelbliches Pulver, das mit vielen Stoffen heftig, häufig unter Feuererscheinung reagiert. Dies gilt besonders für feuchte organische Stoffe.

In Wasser löst sich das Peroxyd unter Sauerstoffentwickelung, wobei zum mindesten intermediär Bildung von Wasserstoffsuperoxyd erfolgt. Die Bildungswärme ist zu etwa 120 Cal. berechnet worden. Von Hydraten sind mehrere in der Literatur beschrieben.

Das Natriumsuperoxyd findet zumal im Laboratorium als vorzügliches Oxydationsmittel, z. B. in der Analyse, zahlreiche Verwendungen. In der Technik wird es besonders als wirksamer Bestandteil in selbsttätigen Waschmitteln in immer ausgedehnterem Maße benutzt. Auch für hygienische Zwecke wird es zur Reinigung von Luft und Wasser vorgeschlagen.

Natriumsulfid Na_2S. Die Verbindung bildet sich direkt aus den Elementen. In der Technik wird sie durch Reduktion von Natriumsulfat mittels Kohle gewonnen. Aus wässeriger Lösung entsteht ein Hydrat mit 9 Molekülen Kristallwasser, das bei gewöhnlicher Temperatur beständig ist. Oberhalb 48,9° beginnen die Existenzgebiete mehrerer anderer Hydrate. Die wasserfreie Verbindung besitzt die Dichte 2,47. Die Bildungswärme aus den Elementen wird zu

88,2 Cal., in Lösung bei der Einwirkung von Schwefelwasserstoff auf Natronlauge zu 7,80 Cal. angegeben.

Die wässerige Lösung des Sulfides reagiert infolge von Hydrolyse entsprechend der geringen Säurestärke des Schwefelwasserstoffes stark alkalisch. Eine verdünnte Schwefelnatriumlösung kann praktisch als eine Mischung äquivalenter Mengen von NaSH- und NaOH-Lösung betrachtet werden. An der Luft tritt Oxydation zu Thiosulfat, bei elektrolytischer Oxydation zu Sulfat ein.

Natriumsulfhydrat NaSH. Die Verbindung wird am einfachsten durch Sättigen von Natronlauge mit Schwefelwasserstoff gewonnen. Die Bildungswärme in Lösung wird zu 60,45 Cal., der festen Verbindung zu 55,7 Cal. angegeben. Aus wässeriger Lösung wurden verschiedene Hydrate erhalten. Die $^1/_{10}$ normale Lösung weist bei 25° einen Hydrolysengrad von 0,12 % auf.

Polysulfide des Natriums. Die in der Literatur vorhandenen zahlreichen, einander widersprechenden Angaben über die verschiedenen bei der Einwirkung von Schwefel auf Natriumsulfid entstehenden Verbindungen sind von Küster einer systematischen Durchprüfung unterzogen. Als besonders beständig erwiesen sich außer dem Monosulfid das Tetrasulfid, das als Salz einer komplexen Schwefel-Schwefelwasserstoffsäure erscheint.

Stickstoff- und Stickstoff-Wasserstoffverbindungen des Natriums. Das Nitrid NNa_3, das bei der dunklen elektrischen Entladung in einer Stickstoffatmosphäre aus metallischem Natrium entsteht, bildet eine blauschwarze Masse, die bei Berührung mit Wasser stürmisch Ammoniak entwickelt. Das Natriumazid NaN_3 bildet sich bei der Neutralisation von Stickstoffwasserstoffsäure N_3H mit Natronlauge oder aus Natriumamid und Stickstoffoxydul entsprechend der Gleichung $NaNH_2 + N_2O = NaN_3 + H_2O$. Die farblosen Kristalle schmelzen ohne Zersetzung und verpuffen im Gegensatz zu den explosiveren Schwermetallsalzen der Säure erst bei hoher Temperatur. In 100 g Wasser von 17° lösen sich 41,7 g des Salzes.

Die bei der Einwirkung von Ammoniak auf Natrium auftretenden tiefdunkelrot bis dunkelblau gefärbten Körper wurden früher als Natriumammonium aufgefaßt. Ruff und Geisel haben aber höchst wahrscheinlich gemacht, daß es sich hierbei ausschließlich um rein physikalische Lösungen des Natriums im Ammoniak handelt. Bemerkenswert erscheint, daß sich diese Lösungen dem elektrischen Strom gegenüber wie Leiter erster Klasse verhalten. Stellt man solche Lösungen durch Eintragen von Natrium in flüssiges Ammoniak dar, und läßt die Lösung sich auf Zimmertemperatur erwärmen, so reagiert das Natrium mit dem Ammoniak unter Bildung von Natriumamid nach der Gleichung $2Na + 2NH_3 = 2NaNH_2 + H_2$. Das reine Amid bildet eine weiße Masse vom Schmelzpunkte 155°. Bei 500° tritt Zersetzung unter Entwickelung von Stickstoff und Wasserstoff und Bildung von Natrium und Natriumnitrid ein.

Bei der Einwirkung von Acetylen auf Natriumamid bildet sich Natriumcyanamid Na_2NNC, das zur Herstellung von Cyannatrium bereits reichliche Verwendung findet. Das Natriumamid selbst wird wegen seiner großen Reaktionsfähigkeit vielfach für organische Synthesen, z. B. in der Indigofabrikation, benutzt.

Auch Verbindungen der Elemente Selen, Tellur, Phosphor, Arsen, Kohlenstoff und Bor mit Natrium sind bekannt. Das Karbid Na_2C_2, das z. B. bei der Einwirkung von Acetylen auf Natriumhydrid gebildet wird, ist sehr reaktionsfähig. Man kann das Acetylen als schwache Säure auffassen. Dementsprechend ist die Löslichkeit des Gases in Natronlauge größer als die des Aethylens.

Natriumhypochlorit NaOCl. Man erhält die stark bleichend wirkende Lösung (Labarraquesche Flüssigkeit) durch Einleiten von Chlor in Natronlauge bei niedriger Temperatur (nicht über 27°). Ein entwässertes Salz mit einem Gehalt von 40 bis 60 % wirksamen Chlors konnte von Muspratt in festem Zustande erhalten werden. Im Großen werden heutzutage Hypochloritlösungen, die namentlich für Wäschereien sowie für Baumwoll- und Strohstoffbleichereien benutzt werden, durch Elektrolyse von Kochsalzlösungen ohne Scheidewand hergestellt. Hierdurch ist den Zersetzungsprodukten Chlor und Natronlauge ohne weiteres Gelegenheit geboten, miteinander zu reagieren. Die elektrolytisch gewonnenen Laugen besitzen vor den auf chemischem Wege erhaltenen den Vorzug, daß sie kein überschüssiges Alkali enthalten, welches die Faser angreift.

Natriumchlorat $NaClO_3$. Das Salz bildet sich beim Einleiten von Chlor in heiße Natronlauge infolge von Zersetzung des primär entstandenen Hypochlorites nach den Gleichungen: $Cl_2 + 2NaOH = NaCl + NaOCl + H_2O$ und $3NaOCl = 2NaCl + NaClO_3$. Von dem gleichzeitig entstehenden Kochsalz kann es durch fraktionierte Kristallisation getrennt werden. Natriumchlorat schmilzt bei 261° und besitzt das spezifische Gewicht 2,996. Es kristallisiert in mehreren Kristallformen, von denen die reguläre Zirkularpolarisation aufweist. Die Bildungswärme aus den Elementen ergab sich zu 86,7 Cal. Die Löslichkeit beträgt bei 20°

99 g, bei 100° 204 g in 100 g Wasser. Die gesättigte Lösung weist die merkwürdige Erscheinung eines doppelten Siedepunktes bei 126° und 255° auf.

Natriumperchlorat $NaClO_4$. Im großen wird das Salz durch elektrolytische Oxydation von Chlorat gewonnen. Neben Chlorid entsteht es auch beim Erhitzen von Chlorat nach der Gleichung $4NaClO_3 = 3NaClO_4 + NaCl$. Es schmilzt bei 482°. Die Bildungswärme aus den Elementen beträgt 100,3 Cal. Durch Messung der Schmelzpunktserniedrigung des Salzes in geschmolzenem Glaubersalz wurde einfache Molekulargröße festgestellt. Die Verbindung hat oxydierende Eigenschaften.

Natriumhypobromit NaOBr. Die Bildung des Salzes entspricht der des Hypochlorits. Die Lösung von Brom in Natronlauge wird in der Analyse als Oxydationsmittel benutzt.

Natriumbromat $NaBrO_3$. Die Darstellung entspricht der des Chlorates. Das feste Salz kristallisiert wie das Chlorat in mehreren Kristallformen, von denen die reguläre ebenfalls das polarisierte Licht dreht. Der Schmelzpunkt liegt bei 381°, die Dichte des Salzes beträgt 3,25. Die Löslichkeit in Wasser wurde bei 20° zu 38,3 g, bei 100° zu 91 g in 100 g Wasser festgestellt.

Natriumhypojodit NaJO. Das Salz, das bei der Einwirkung von Jod auf wässerige Natronlauge entsteht, zerfällt außerordentlich leicht in Jodid und Jodat nach der Gleichung $3NaJO = NaJO_3 + 2NaJ$.

Natriumjodat $NaJO_3$. Die Verbindung kommt in der Natur als Begleiter des Chilisalpeters vor. Sie reichert sich in den Mutterlaugen an und wird auf Jod verarbeitet. Technisch kann man sie auf elektrolytischem Wege gewinnen. Das feste Salz besitzt das spezifische Gewicht 4,277, die Löslichkeit beträgt bei 20° 9,1 g, bei 100° 33,9 g in 100 g Wasser.

Natriumperjodate. In der Literatur ist eine ganze Reihe von Perjodaten beschrieben, die sich von der Ueberjodsäure HJO_4 und deren Hydraten ableiten. Das normale Salz $NaJO_4$ besitzt das spezifische Gewicht 3,865. Auch mehrere Hydrate sind hiervon bekannt. Als allgemeine Regel ergibt sich, daß alle Salze der Reihe, bei denen das Verhältnis Natrium: Jod den Wert 1:1 übersteigt, wenig beständig sind. Das Dinatriumsalz, das sich z. B. beim Einleiten von Chlor in ein äquivalentes Gemisch von Natronlauge und Natriumjodat bildet, weist optische Aktivität auf. Die Löslichkeit ist gering und steigt mit der Temperatur nur wenig an.

Natriumhydrosulfit $Na_2S_2O_4$ wird durch Reduktion von Natriumbisulfit $NaHSO_3$ durch Zinkstaub in Gegenwart von schwefliger Säure gewonnen. Durch Aussalzen mit Kochsalz erhält man das 2-Hydrat der Verbindung. Das Salz, das durch Auswaschen mit Aceton und Trocknen im Vacuum wasserfrei und in luftbeständigem Zustande gewonnen wird, findet als wertvolles Reduktionsmittel in der Farbenindustrie, z. B. zur Herstellung von Indigweiß, ausgedehnte Verwendung.

Natriumsulfit Na_2SO_3. Das wasserfreie Salz entsteht durch Erhitzen von Natriumbisulfit mit der entsprechenden Menge Bikarbonat. Die Lösungswärme beträgt +2,5 Cal. Da dieser Wert positiv ist, muß nach dem Le Chatelierschen Prinzip die Löslichkeit des anhydrischen Salzes mit steigender Temperatur kleiner werden. Tatsächlich beträgt die Löslichkeit bei 40° 49,5 g, bei 100° 33 g in 100 g Wasser. Bei etwa 33° wandelt sich das wasserfreie Salz in das bei gewöhnlicher Temperatur beständige 7-Hydrat um.

Natriumbisulfit $NaHSO_3$ entsteht bei der Einwirkung von Schwefeldioxyd auf Sodalösung. Die wässerige Lösung wirkt reduzierend.

Natriumsulfat Na_2SO_4. Das wasserhaltige Salz ist auch unter dem Namen „Glaubersalz" bekannt. Der Arzt und Chemiker Glauber hat es um die Mitte des 17. Jahrhunderts zuerst zu Heilzwecken verwandt. Die Fähigkeit des Salzes, die Darmtätigkeit anzuregen, kommt z. B. im Karlsbader Wasser, das merkliche Mengen davon enthält, zum Ausdruck. In der Natur findet es sich in verschiedenen Formen in den ozeanischen Salzablagerungen. In der Technik spielt es eine hervorragende Rolle in der Soda- und Salpeterindustrie. Es entsteht z. B. bei der Einwirkung von Schwefelsäure auf Kochsalz (Leblancsche Sodagewinnung), ferner auf Chilesalpeter (Fabrikation von Salpetersäure). In den Abraumsalzen der Salzlager findet sich u. a. Kochsalz neben Magnesiumsulfat. Aus der Lösung beider Salze kann beim Abkühlen auf —3° ebenfalls Natriumsulfat gewonnen werden.

Das Sulfat kommt wasserfrei in verschiedenen Kristallformen, ferner als (metastabiles) 7-Hydrat und als bei gewöhnlicher Temperatur stabiles 10-Hydrat vor. Das wasserfreie Salz schmilzt bei etwa 880°, die Dichte beträgt 2,67, die Bildungswärme 328,6 Cal. Die Lösungswärme wurde für das Dekahydrat zu —18,8 Cal., für das wasserfreie Salz zu +0,46 Cal. gefunden. Dementsprechend nimmt die Löslichkeit des Hydrates mit steigender Temperatur zu, die des Anhydrides ab. Der Umwandlungspunkt von Dekahydrat in Anhydrid liegt bei 32,383°, der eutektische Punkt für Dekahydrat und Eis bei —1,2°. Das Heptahydrat

ist in seinem ganzen Existenzbereich metastabil. Es kann nur aus übersättigten Lösungen erhalten werden. Ueberhaupt sind Glaubersalzlösungen sehr zur Uebersättigung geneigt. Die Kristalle des Glaubersalzes besitzen hohe Dampfspannung des Kristallwassers und verwittern daher an trockener Luft.

Bei der Elektrolyse des Natriumsulfates entsteht Natriumpersulfat $Na_2S_2O_8$, das stark oxydierende Eigenschaften besitzt.

Das Natriumhydrosulfat $NaHSO_4$ kristallisiert aus der Lösung des Sulfates in Schwefelsäure als Monohydrat, das bei höherer Temperatur in wasserfreies Salz übergeht.

Das Natriumthiosulfat $Na_2S_2O_3$ wird im großen durch Umsetzung von Calciumthiosulfat, das durch Oxydation des in den Rückständen von der Sodafabrikation nach Leblanc enthaltenen Schwefelcalciums CaS an der Luft entsteht, mit Natriumsulfat erhalten. Es bildet sich auch bei der Behandlung von neutralem Natriumsulfit mit Schwefel nach der Gleichung $Na_2SO_3 + S = Na_2S_2O_3$. Das Salz bildet eine große Reihe von Hydraten. Das wichtigste ist das Pentahydrat, denn in dieser Form kommt es gewöhnlich in den Handel. Das spezifische Gewicht des 5-Hydrates beträgt 1,736, das des wasserfreien Salzes 1,667. Die Bildungswärme aus den Elementen wird zu 265,1 Cal. für das 5-Hydrat angegeben.

Die Löslichkeit des 5-Hydrates beträgt bei 0° 33,4, bei 30° 45,2 g in 100 g Wasser. Der eutektische Punkt für Pentahydrat und Eis wurde zu —11° bestimmt. Das Salz schmilzt bei 48,45° in seinem Kristallwasser und liefert haltbare übersättigte Lösungen, die beim Eintragen von Keimen des festen Salzes unte starker Wärmeentwickelung erstarren. Während konzentrierte wässerige Lösungen von Thiosulfat gut haltbar sind, zeigen verdünnte Lösungen leicht Zersetzungserscheinungen, da bereits durch Kohlensäure aus der Luft freie Thioschwefelsäure abgeschieden wird, die leicht in Schwefel und schweflige Säure zerfällt.

Das Thiosulfat findet in der Technik zahlreiche Verwendungen, z. B. als Fixiersalz in der Photographie, indem es die bei der Entwickelung nicht reduzierten Halogensilberteilchen unter Bildung komplexer Salze herauslöst, ferner als „Antichlor" in der Bleicherei, da es freies Chlor in Ionenform überführt entsprechend der Gleichung: $Na_2S_2O_3 + 4Cl_2 + 5H_2O = 2NaCl + 2H_2SO_4 + 6HCl$. In der Analyse findet es in der Jodometrie Verwendung. Die Reaktion beruht auf der Bildung von Tetrathionat nach der Gleichung: $2Na_2S_2O_3 + J_2 = Na_2S_4O_6 + 2NaJ$

Natriumnitrit $NaNO_2$ wird im großen durch Reduktion von Nitrat mit Metallen, Schwefel, Kohle u. a. dargestellt. Es findet ausgedehnte Verwendung in der Farbstoffindustrie zum Diazotieren. Der Schmelzpunkt des Salzes liegt bei 213°, die Löslichkeit beträgt bei 15° 83,3 g in 100 g Wasser.

Natriumnitrat $NaNO_3$ findet sich in der Natur als Chilesalpeter. Die Frage der Entstehung dieser Lager ist noch nicht geklärt, vielleicht sind sie auf die Oxydation stickstoffhaltiger organischer Verbindungen, zumal von Seepflanzen zurückzuführen, worauf auch die stete Gegenwart von Jodverbindungen hindeutet. Vorbedingung muß hierbei große Wasserarmut sein, da sonst der Natronsalpeter äußerst leicht zerfließen würde. Tatsächlich fällt in der Gegend, in der sich Salpeterlager befinden (an der Grenze von Chile und Peru) jahrelang kein Regen, so daß Pflanzenwuchs überhaupt dort fehlt.

Der rohe Chilesalpeter („Caliche") ist durch Ton, Sand, Kochsalz, Natriumjodat, Natriumperchlorat sowie durch Sulfate verunreinigt.

Das Salz schmilzt bei 316°, das spezifische Gewicht bei 20° beträgt 2,267, die Bildungswärme aus den Elementen 111,25 Cal. Die Neutralisationswärme beim Vermischen von 1 Mol. Salpetersäure und 1 Mol. Natronlauge wurde wie bei allen starken Säuren und Basen zu 13,7 Cal. entsprechend der Bildungswärme des Wassers aus den Ionen ermittelt. Die Lösungswärme des Salzes in Wasser ist negativ, die Löslichkeit steigt daher mit der Temperatur merklich an. Sie beträgt bei 0° 73 g; bei 119°, dem Siedepunkt der gesättigten Lösung 208,8 g in 100 g Wasser. Die Kristalle des Salzes sind stark doppelbrechend.

Die Hauptverwendung findet das Salz als Düngemittel, ferner zur Herstellung von Salpetersäure und Natriumnitrit. Zur Schießpulverbereitung kann es wegen seiner hygroskopischen Eigenschaften nicht verwendet werden (siehe Kaliumnitrat). Der Verbrauch an Chilesalpeter betrug 1907 über 568 000 t im Werte von 122 Mill. M.

Natriumphosphate. Das Dinatriumorthophosphat Na_2HPO_4 bildet sich unmittelbar bei der Neutralisation von Phosphorsäure mit Sodalösung. In Form des 12-Hydrates bildet es das gewöhnliche Natriumphosphat des Handels. Die Dichte dieses Salzes wird zu 1,537 angegeben. Die Löslichkeit der Verbindung steigt bis 100° an, um darüber abzunehmen. Bei etwa 36,5° tritt Umwandlung in ein 7-Hydrat ein. Die Löslichkeit beträgt bei 20° 9,3, bei 99° 68,8 und bei 106,4 dem Siedepunkt der gesättigten Lösung 79,2 g in 100 g Wasser. Die wässerige Lösung reagiert schwach al-

kalisch. Beim Erhitzen auf 300° geht das Dinatriumphosphat in Natriumpyrophosphat $Na_4P_2O_7$ vom Schmelzpunkt 970° und der Dichte 2,534 über.

Das Dinatriumphosphat wandelt sich beim Behandeln mit der berechneten Menge Natronlauge in das Trinatriumsalz Na_3PO_4 um, das sich aus heißer Lösung als 12-Hydrat abscheidet. Bei 73,3° findet Bildung eines niedrigeren Hydrates statt. Die wässerige Lösung reagiert stark alkalisch.

Behandelt man das Dinatriumsalz mit Phosphorsäure, so bildet sich das Mononatriumsalz NaH_2PO_4, das in Form eines Mono- und Dihydrates erhalten wurde. Die Löslichkeit beträgt bei 18° 84,6 g in 100 g Wasser. Die Lösung reagiert sauer. Beim Erwärmen verliert das Mononatriumsalz zunächst sein Kristallwasser, geht dann bei etwa 200° in saures Pyrophosphat der Formel $Na_2H_2P_2O_7$, schließlich in Metaphosphat $NaPO_3$ über.

Den Phosphaten entsprechen analog zusammengesetzte Arsenate und Antimonate. Von letzteren ist das saure Pyroantimonat $Na_2H_2Sb_2O_7$ als wenig lösliches Natriumsalz, das in der Analyse Verwendung findet, bemerkenswert.

Natriumkarbonat Na_2CO_3 („Soda") kommt in der Natur in Mineralwässern und in Seen zum Teil in beträchtlicher Menge vor. Auch in fester Form tritt es bisweilen, besonders als Auswitterung („Mauersalpeter") auf. In der Technik wird es im wesentlichen aus Chlornatrium nach dem Leblancschen, dem Solvayschen oder dem elektrolytischen Verfahren gewonnen. Andere Methoden, z. B. aus Kryolith, haben geringere Bedeutung.

Beim Leblanc-Verfahren wird das Kochsalz mit Schwefelsäure in Natriumsulfat verwandelt, letzteres durch Kohle zu Schwefelnatrium reduziert und dieses mit Kalziumkarbonat zu Soda und Schwefelcalcium umgesetzt. Hierfür gelten die Gleichungen: 1. $2NaCl + H_2SO_4 = Na_2SO_4 + 2HCl$. 2. $Na_2SO_4 + 2C = Na_2S + 2CO_2$. 3. $Na_2S + CaCO_3 = Na_2CO_3 + CaS$.

Wegen des großen Verbrauches an Schwefelsäure, während als Nebenprodukte Salzsäure und Schwefelcalcium entstehen (letzteres dient zur Gewinnung von Schwefel und Thiosulfat), sind in der Regel mit der Sodafabrik noch mehrere andere Betriebe verbunden.

Das ältere Leblanc-Verfahren ist seit etwa 1870 durch das Solvaysche Ammoniaksodaverfahren so gut wie vollständig verdrängt worden. Von den 2,1 Mill. t Soda, die 1908 in der Welt erzeugt sind, wurden nur noch 100 000 t nach Leblanc hergestellt.

Das Solvay-Verfahren geht ebenfalls von Chlornatrium aus. Durch Behandlung mit Ammoniumkarbonat entstehen Chlorammonium und Natriumhydrokarbonat. Letzteres wird durch Glühen in neutrales Karbonat übergeführt: 1. $2NaCl + 2NH_4HCO_3 = 2NaHCO_3 + 2NH_4Cl$. 2. $CaCO_3 = CaO + CO_2$. 3. $CaO + 2NH_4Cl = CaCl_2 + 2NH_3 + H_2O$. 4. $2NaHCO_3 = H_2O + CO_2 + Na_2CO_3$. Das Ammoniumkarbonat wird aus Ammoniak und Kohlensäure gewonnen. Die Kohlensäure erhält man durch Glühen von Kalkstein. Der als Nebenprodukt entstehende Kalk dient zur Regenerierung des Ammoniaks aus dem Chlorammonium.

In neuerer Zeit ist die Sodadarstellung unter Benutzung der Elektrolyse von Kochsalzlösung, nämlich durch Einleiten von Kohlensäure in elektrolytisch aus Kochsalz gewonnene Natronlauge mit dem Solvay-Verfahren in erfolgreichen Wettbewerb getreten.

Das feste Salz schmilzt bei 852° und besitzt das spezifische Gewicht 2,476. Von Hydraten ist am wichtigsten das 10-Hydrat, die kristallisierte Soda des Handels. Es bildet monokline Kristalle vom spezifischen Gewicht 1,45. Die Löslichkeit beträgt bei 20° 21,4 g in 100 g Wasser. Bei 32° geht das 10-Hydrat in 7-Hydrat, bei 35,4° letzteres wiederum in 1-Hydrat über. Die Löslichkeiten für das 1-Hydrat nehmen mit steigender Temperatur etwas ab. Die Siedetemperatur der gesättigten Lösung, welche 45,1 g Salz in 100 g Wasser enthält, liegt bei 104,7°, der eutektische Punkt für Eis und 12-Hydrat wurde bei —2,1° gefunden.

Die Bildungswärme des wasserfreien Salzes aus den Elementen beträgt 272,6 Cal.

Die wässerige Lösung zeigt stark alkaliche Reaktion infolge von Hydrolyse. Der Hydrolysengrad der $^1/_{13}$-molaren Lösung wurde bei 25° zu etwa 6% gefunden. Dementsprechend geben Sodalösungen beim längeren Erhitzen etwas Kohlensäure ab.

Die Soda findet abgesehen vom Haushalt und Laboratorium hauptsächlich in der Seifen- und Fettindustrie, ferner bei der Glasfabrikation Verwendung.

Das Natriumbikarbonat $NaHCO_3$ entsteht durch Einwirkung von Kohlensäure auf Sodalösung oder von Ammoniumbikarbonat auf Kochsalz im Solvay-Prozeß. Es bildet monokline Kristalle vom spezifischen Gewicht 2,206. Beim Erwärmen zerfällt es nach der vorher angeführten Gleichung 4 unter heftiger Entwickelung von Kohlensäure. Die Bildungswärme wurde zu 229,3 Cal. bestimmt.

Die Löslichkeit beträgt bei 20° 9,6 g in 100 g Wasser. Die wässerige Lösung reagiert nur äußerst schwach alkalisch. Die Energetik der Bildung des Salzes ist von Bodländer und Breull aufgeklärt worden.

Das Salz wird in der Medizin sowie infolge seiner Kohlensäureentwickelung zur Herstellung von Back- und Brausepulvern benutzt.

Natriumsilikate werden in der Technik durch Zusammenschmelzen von Soda und Sand gewonnen. Das Natronwasserglas ist die wässerige Lösung derartiger Schmelzen, die in der Regel 3 bis 4 SiO_2 auf ein Molekül Natriumoxyd enthalten. Die wässerige Lösung reagiert stark alkalisch.

Von den zahlreichen Verbindungen der Reihe ist nur das Metasilikat Na_2SiO_3 vom Schmelzpunkt 1007° mit Sicherheit bekannt.

Technisch findet das Natronwasserglas besonders wegen seiner bindenden Eigenschaften, ferner als feuersicheres Imprägnierungsmittel, z. B. für Theaterdekorationen, sowie in der Zeugdruckerei Verwendung. In Deutschland wurden 1907 etwa 18 000 t Wasserglas erzeugt.

Von den Natriumboraten ist das bekannteste der Borax $Na_2B_4O_7.10H_2O$, der sich auch z. B. in Tibet und Kalifornien in der Natur findet. In großem Maßstabe wird die Verbindung aus Borsäure und Natriumkarbonat hergestellt. Das 10-Hydrat kristallisiert in monoklinen Kristallen vom spezifischen Gewicht 1,7, die an der Luft verwittern. Ferner ist noch ein 5-Hydrat bekannt. Beim Erhitzen von Borax bildet sich unter starkem Aufblähen die wasserfreie Verbindung. Die Löslichkeit beträgt für das 10-Hydrat bei 10° 1,6 g in 100 g Wasser.

Borax wird in der chemischen Analyse (Boraxperle) sowie besonders zum Löten benutzt. Beide Anwendungen beruhen auf der Fähigkeit des geschmolzenen Salzes, Metalloxyde aufzulösen.

Bei der Einwirkung von Wasserstoffsuperoxyd auf Borax oder bei der Elektrolyse des Salzes entstehen Perborate, die als Oxydationsmittel in der Hygiene und in Waschmitteln Verwendung finden.

Literatur. *W. Hinrichsen, Natrium, In Abeggs Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II, 1. Teil, Leipzig 1908.*

W. Hinrichsen.

c) Kalium.

K. Atomgewicht 39.10.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte 4. Darstellung. 5. Chemische und physikalische Eigenschaften. 6. Elektrochemie. 7. Analytische Chemie. 8. Kolloidchemie. 9. Verbindungen des Kaliums.

1. Atomgewicht des Elementes. Die Konstante wurde in neuerer Zeit von Richards, Stähler und Müller durch Analyse des Chlorids und Bromids zu 39,10 festgestellt. Der Wert entspricht gut dem Dulong-Petitschen Gesetze und der Stellung des Elementes im periodischen System.

2. Vorkommen. Das Kalium findet sich in der Natur in etwa gleicher Menge wie das Natrium, zeigt aber geringere Verbreitung. Besonders im Meerwasser sind nur verhältnismäßig geringe Mengen von leicht löslichen Kalisalzen vorhanden. Dagegen sind viele Mineralien reich an Kali, z. B. der Kalifeldspat, Muskowit, Leucit u. a. In den durch ozeanische Ablagerungen entstandenen Salzlagern bilden die zuletzt abgeschiedenen leichter löslichen Kalisalze die oberste Schicht („Abraumsalze"). Sie bilden die Hauptquelle für den Kalibedarf der Landwirtschaft und Industrie. Erwähnt seien z. B. der Karnallit $KCl.MgCl_2.6H_2O$, der Kainit $KCl.MgSO_4.3H_2O$ und der Sylvin KCl.

Auch die Asche der Landpflanzen ist reich an Kalisalzen. Dies hängt mit einer merkwürdigen Eigenschaft der Ackerkrume zusammen, welche Kalisalze zurückhält, dagegen Natronsalze an Wasser leicht abgibt Wird durch die Ernte dem Boden zu viel Kali entzogen, so muß dieses durch künstliche Düngung wieder ersetzt werden. Auch der Schweiß der Schafe wird wegen seines hohen Gehaltes an Kalisalzen auf Pottasche verarbeitet.

3. Geschichte des Elementes. Zur Geschichte des Kaliums ist der Artikel „Natrium" zu vergleichen.

4. Darstellung des Metalles. Die Verfahren zur Gewinnung des Kaliums entsprechen denen des Natriums. Auf chemischem Wege wird das Element durch Erhitzen von Pottasche mit Kohle oder in neuerer Zeit in großem Maßstabe elektrochemisch aus geschmolzenem Kaliumhydroxyd gewonnen. Bei letzterer Darstellungsweise treten dadurch, daß sich das Metall von der Kathode her in sogenannten Metallnebeln verbreitet, Störungen auf. Diese werden vermieden durch Einkapseln der Kathode in eine Hülle von z. B. Magnesit.

5. Chemische und physikalische Eigenschaften des Kaliums. Das Metall ist noch stärker reaktionsfähig als das Natrium. An der Luft läuft es unter Bildung von Hydroxyd an. Mit Wasser reagiert es unter so starker Wärmeentwickelung, daß der entstehende Wasserstoff sich ohne weiteres entzündet.

Das Metall, das silberweiße Farbe besitzt, ist bei gewöhnlicher Temperatur weich, wird aber in der Kälte hart und spröde. Seine Härte ist größer als die des Natriums, Rubidiums und Cäsiums, dagegen kleiner als die des Lithiums.

Das spezifische Gewicht wurde bei 20° zu 0,862 gefunden, das Element ist also spezifisch leichter als das Natrium. Dement-

sprechend ist das Atomvolumen von 45,4 erheblich größer als im Falle des Natriums. Die gleiche Beziehung besteht auch bei den Verbindungen beider Elemente. Der Schmelzpunkt liegt bei 62,5 °, der Siedepunkt etwa bei 750 °.

Das Metall kristallisiert in Würfeln. In sehr dünner Schicht erscheint es blauviolett. Der Dampf besitzt nahe beim Siedepunkte grünliche, bei höheren Temperaturen violette Farbe.

Die spezifische Wärme wurde zu 0,1662 gefunden, woraus sich die Atomwärme 6,5 berechnet.

Das Kalium ist ein guter Leiter für Wärme und Elektrizität und zeigt schwach magnetische Eigenschaften.

6. Elektrochemie des Kaliums. Das Element bildet ausschließlich einwertige Ionen. Seine Ionisierungstendenz ist noch größer als die des Natriums und wird nur noch von der des Rubidiums und Cäsiums übertroffen. Das elektrolytische Potential ist zu — 3,2 Volt berechnet worden. Es besitzt also die größte Entladungsspannung von allen bekannten Ionen. Die Ionisierungswärme von 1 Grammatom wurde zu 62 Cal. gefunden.

Durch die große Elektroaffinität des Elementes ist die große Löslichkeit der weitaus meisten seiner Salze sowie die geringe Neigung zur Komplexbildung und Hydratation bedingt. Bereits im festen Zustande enthalten die meisten Salze des Kaliums nur geringen Gehalt an Kristallwasser. Die Salze des Kaliums mit schwachen Säuren sind stark hydrolysiert und weisen daher stark alkalische Reaktion auf.

Das Kaliumion ist farblos, seine elektrolytische Beweglichkeit beträgt 64,6. Dieser Wert ist merklich größer als beim Natrium und Lithium. Vielleicht hängt dies mit geringerer Hydratation und dementsprechend geringerer Reibung des Kaliumions zusammen.

7. Analytische Chemie des Kaliums. Die meisten Salze des Elementes sind, wie bereits erwähnt, leicht löslich und zu Fällungsreaktionen daher nicht geeignet. Ausnahmen bilden das Chlorat, Perchlorat, Hydrotartrat (Weinstein) und einige komplexe Verbindungen wie das Chloroplatinat K_2PtCl_6. Besonders das letztere dient zur quantitativen Trennung vom Natrium, sofern nicht die beim Natrium bereits beschriebene indirekte Analyse angewendet wird.

Der qualitative Nachweis wird durch die violette Flammenfärbung sehr erleichtert, die bei Betrachtung durch ein Indigoprisma rot erscheint. Da hierbei auch die gelbe Flammenfärbung des Natriums verdeckt wird, ist der qualitative Nachweis des Kaliums auch neben Natrium leicht durchführbar. Im Spektrum des Kaliums treten besonders zwei rote Linien (λ = 769,7 und 766,4), eine orangefarbene (λ = 693,9) und eine violette Linie (λ = 404,3) hervor.

8. Kolloidchemie des Kaliums. Das Metall wurde von S v e d b e r g in ähnlicher Weise wie das Natrium durch elektrisches Zerstäuben in Aether in den kolloidalen Zustand übergeführt. Das Kaliumsol zeigte hierbei blaue bis blaugrüne Farbe.

9. Verbindungen des Kaliums. K a l i u m h y d r i d KH. Die Verbindung wurde entsprechend der Natriumverbindung in weissen Kristallen vom spezifischen Gewicht 0,80 aus den Elementen erhalten.

K a l i u m f l u o r i d KF. Das Fluorid, das z. B. beim Neutralisieren von Kaliumkarbonat mit Flußsäure erhalten wird, bildet reguläre Kristalle vom spezifischen Gewicht 2,481. Bei gewöhnlicher Temperatur bildet es ein 2-Hydrat, von dem sich bei 18 ° 92,3 g in 100 g Wasser lösen.

Mit Flußsäure tritt das Salz zu komplexen sauren Salzen zusammen, von denen die Verbindung KF.HF besonderes historisches Interesse verdient, weil seine Lösung in wasserfreier Flußsäure zur erstmaligen Darstellung des freien Fluors (durch Elektrolyse) gedient hat.

K a l i u m c h l o r i d KCl. Das Salz kommt in der Natur, wie bereits erwähnt, als Sylvin, ferner in Doppelsalzen mit Magnesiumchlorid als Karnallit $KCl.MgCl_2.6H_2O$ sowie mit Magnesiumsulfat als Kainit $KCl.MgSO_4.3H_2O$ vor. Reichliche Mengen von Chlorkalium finden sich auch in der Pflanzenasche sowie namentlich in der Melassenschlempe, d. h. der Salzmasse, die aus Zuckerrübenmelasse nach der Verarbeitung auf Spiritus zurückbleibt. In reinem Zustande wird die Verbindung durch Neutralisation von Salzsäure mit Kaliumkarbonat erhalten.

Technisch wird Chlorkalium, das als Ausgangmaterial für die meisten anderen Kaliumsalze dient und daher besondere Bedeutung besitzt, zumeist aus den oben genannten Staßfurter Abraumsalzen, besonders dem Karnallit, gewonnen, da Sylvin nur in untergeordneter Menge vorkommt. Der Gehalt des Karnallits an Chlorkalium beträgt 26,6 %. Die Gewinnung des letzteren ist durch den leichten Zerfall des Karnallits in seine Komponenten bei Berührung mit Wasser verhältnismäßig einfach. Die Produktion an Kalisalzen betrug im Jahre 1905: Kainit 2405, Sylvin 230 und Karnallit 2240 Tausend Tonnen.

Das Kaliumchlorid kristallisiert in farblosen Würfeln vom spezifischen Gewicht 1,977. Der Schmelzpunkt liegt bei etwa 775 °. Bei hoher Temperatur verflüchtigt es sich ohne Zersetzung, so daß die Molekulargröße

des Salzes unmittelbar durch Dampfdichtebestimmung bei etwa 2000 ° bestimmt werden konnte. Hierbei ergab sich der der einfachen Formel KCl entsprechende Wert.

Das feste Salz besitzt ebenso wie Chlornatrium die Eigenschaft sich unter dem Einflusse von Kathoden- oder Radiumstrahlen wie auch beim Erhitzen mit metallischem Kalium zu färben. Entsprechend der durch Kalium bewirkten Flammenfärbung sowie der Farbe der kolloiden Aetherlösung weist auch das bestrahlte Chlorkalium violette Farbe auf.

Die Bildungswärme aus den Elementen wurde zu 105,6 Cal., die Neutralisationswärme von 1 Mol. Salzsäure mit 1 Mol. Kalilauge zu 13,75 Cal. ermittelt. Die Lösungswärme beträgt — 4,4 Cal., daher steigt die Löslichkeit des Salzes in Wasser mit der Temperatur merklich an. Sie beträgt bei 20 ° 34,3, bei 100 ° 56,6 g in 100 g Wasser, während beim Chlornatrium keine wesentliche Erhöhung der Löslichkeit mit der Temperatur stattfindet.

Die wässerige Lösung der Verbindung reagiert neutral. Hydrate sind entsprechend der großen Elektroaffinität des Kaliums im Gegensatz zum Chlornatrium nicht bekannt.

Die elektrische Leitfähigkeit von Chlorkaliumlösungen ist sehr genau ermittelt, da derartige Lösungen meist als Normalflüssigkeiten zur Eichung von Widerstandsgefäßen verwendet werden. So wurden bei 18 ° z. B. die folgenden Werte gefunden:

Konzentration Mol/Liter	Leitfähigkeit	Dissoziationsgrad
1	98,27	75,5 %
0,1	112,03	86,1 ,,
0,01	122,43	94,1 ,,
0 001	127,34	97,9 ,,
0,0001	129,07	99,2 ,,

K a l i u m b r o m i d KBr. Die Verbindung wird in der Regel unmittelbar durch Behandeln von Kalilauge mit Brom hergestellt. Das nebenbei entstehende Bromat kann von dem Bromid infolge der größeren Löslichkeit des letzteren auf dem Wege der Kristallisation getrennt oder durch Reduktion ebenfalls in Bromid übergeführt werden. Die Verbindung kristallisiert in farblosen Würfeln vom spezifischen Gewicht 2,73 bei 25 °. Der Schmelzpunkt liegt bei etwa 740 °, die Bildungswärme aus den Elementen beträgt 95,3 Cal.

Die wässerige Lösung reagiert neutral. Hydrate sind wiederum nicht bekannt. Die Löslichkeit beträgt bei 20 ° 65, bei 100 ° 105 g KCl in 100 g Wasser.

Das Salz wird in der Medizin als Nervenberuhigungsmittel, in der Photographie bei der Fabrikation von Trockenplatten benutzt.

K a l i u m j o d i d KJ. Das Salz wird rein durch Neutralisieren von Pottaschelösung mit Jodwasserstoffsäure, technisch meist aus Jod und Kalilauge gewonnen. Das nebenbei entstehende Jodat wird durch Erhitzen oder durch Reduktion z. B. mit Kohle ebenfalls in Jodid übergeführt. Auch das im Chilesalpeter in der Natur vorkommende Jodat wird auf Kaliumjodid verarbeitet. Im großen wird es durch Umsetzung des aus den Elementen entstehenden Eisenjodürs Fe_3J_8 mit Kalilauge erhalten.

Die Verbindung bildet reguläre Kristalle vom spezifischen Gewicht 3,07. Der Schmelzpunkt liegt bei etwa 700 °. Das Salz ist in Wasser leicht löslich. Die wässerige Lösung reagiert neutral, färbt sich aber an der Luft unter der Einwirkung von Sauerstoff und Kohlensäure durch Jodabscheidung gelb. Die Löslichkeit beträgt bei 20 ° 144, bei 100 ° 209 g in 100 g Wasser. Die Lösungen von Jodkalium sind befähigt, Jod unter Bildung komplexer Polyjodide aufzunehmen.

Auch das Kaliumjodid findet in der Medizin und Photographie Verwendung. Das gute Lösungsvermögen der Lösungen für Jod wird in der Maßanalyse für jodometrische Bestimmungen benutzt (vgl. den Artikel „N a t r i u m“ unter Natriumthiosulfat).

K a l i u m c y a n i d KCN. Die Verbindung wird z. B. aus Kaliumferrocyanid (gelbem Blutlaugensalz) $K_4Fe(CN)_6$ durch Erhitzen für sich unter Luftabschluß oder mit Kaliumkarbonat und Kohle gewonnen. Auch beim Schmelzen des Blutlaugensalzes mit metallischem Natrium entsteht Cyankalium. Das so hergestellte Salz ist meist durch merkliche Menge Cyannatrium verunreinigt. Auch bei den Verfahren zur Gewinnung des Luftstickstoffes mittels Karbid wird Cyankalium erhalten.

Das Salz findet Verwendung zur Gewinnung von Edelmetallen, die durch Lösungen des Salzes unter Bildung komplexer Verbindungen ausgelaugt werden. Derartige komplexe Edelmetallsalzlösungen finden auch in der Galvanoplastik Verwendung, ferner auch in der Photographie, bei der Silbersalze mit Cyankalium gelöst werden. Infolge der leichten Oxydierbarkeit des Cyankaliums, das hierbei in Cyanat KCNO übergeht, wird es auch als Reduktionsmittel, z. B. bei Lötrohrversuchen, benutzt.

Das Cyanid kristallisiert in farblosen Würfeln vom spezifischen Gewicht 1,52. Die Bildungswärme aus den Elementen beträgt 32,5 Cal., die Neutralisationswärme von 1 Mol. Blausäure mit 1 Mol. Kaliumhydroxyd in wässeriger Lösung 2,77 Cal.

In Wasser löst sich das Salz leicht. Die Lösungen reagieren infolge von Hydrolyse stark alkalisch und zeigen deutlichen Geruch nach undissoziiertem Cyanwasserstoff. Der Hydrolysengrad in $^1/_{10}$ normaler Lösung beträgt 0,96 %.

Kaliumrhodanid KCNS bildet sich beim Schmelzen von Cyankalium mit Schwefel. Die farblosen zerfließlichen Kristalle besitzen das spezifische Gewicht 1,886 und den Schmelzpunkt 172 °. Die Löslichkeit bei 25 ° wurde zu 239 g in 100 g Wasser ermittelt. Das Salz findet u. a. in der chemischen Analyse Verwendung.

Kaliumhydroxyd KOH (Aetzkali) wird in gleicher Weise wie Natriumhydroxyd, in erster Linie also durch Elektrolyse von Kaliumchlorid oder auch aus Kaliumkarbonat und Kalk in wässeriger Lösung gewonnen. Beim Eindampfen bleibt das Hydroxyd als weiße, meist strahlige Masse vom spezifischen Gewicht 2,044 zurück. Die Bildungswärme aus den Elementen beträgt 103,2 Cal. Bei der Auflösung in Wasser tritt starke Erwärmung auf. Die Lösungswärme von 1 Mol. KOH in 250 Mol. Wasser ergab sich zu + 13,3 Cal. Aus der wässerigen Lösung konnten mehrere verschiedene Hydrate gewonnen werden.

Im übrigen entsprechen die Eigenschaften des Kaliumhydroxyds durchaus denen der Natriumverbindung. Die wässerige Lösung des Kaliumhydroxydes, Kalilauge, stellt infolge der größeren Elektroaffinität des Kaliums eine noch stärkere Base dar als die Natronlauge, liefert also in Lösung noch mehr OH-Ionen. Noch stärker positiv als das Kalium sind nur noch Rubidium und Cäsium, deren Hydroxydlösungen denn auch die Kalilauge an Basizität noch übertreffen.

Aetzkali findet vielseitige Verwendung, z. B. in der Seifenfabrikation, der Farbenindustrie, bei der Herstellung von Wasserglas und im Laboratorium. In Deutschland wurden 1904 etwa 30 000 bis 35 000 t gewonnen, hiervon wurde der weitaus größte Teil, etwa 28 000 t durch Elektrolyse von Chlorkaliumlösung erzeugt.

Kaliumoxyde. Beim Verbrennen von Kalium an der Luft bildet sich eine gelbe Verbindung der Zusammensetzung K_2O_4. Beim Auflösen in Wasser zerfällt es in Kalilauge, Wasserstoffsuperoxyd und Sauerstoff.

Beim Erhitzen des Tetroxydes mit metallischem Kalium oder bei der unvollständigen Oxydation des Kaliums entsteht das Monoxyd K_2O vom spezifischen Gewicht 2,32, das sich bei 400° zersetzt und beim Eintragen in Wasser unter heftiger Wärmeentwickelung zu Kalilauge löst.

Kaliumsulfid K_2S wird unmittelbar aus den Elementen bei gelindem Erwärmen oder durch Reduktion von Kaliumsulfat erhalten, ferner durch Zusammenbringen äquivalenter Mengen von Kaliumhydroxyd und Kaliumhydrosulfid KSH, welches man beim Sättigen von Kalilauge mit Schwefelwasserstoff gewinnen kann. Das Sulfid stellt eine farblose Masse vom spezifischen Gewicht 2,13 dar. Die Bildungswärme aus den Elementen beträgt 103,5 Cal. Es sind mehrere Hydrate beschrieben, von denen nur das 5-Hydrat negative Lösungswärme besitzt. Nur bei diesem steigt daher die Löslichkeit mit der Temperatur an.

Die wässerige Lösung weist infolge von Hydrolyse gemäß der Gleichung $K_2S + H_2O = KOH + KSH$ stark alkalische Reaktion auf.

Die wässerige Lösung nimmt Schwefel unter Bildung von Polysulfiden in ähnlicher Weise wie beim Natrium beschrieben auf. Das beständige Glied der Reihe ist auch hier das Tetrasulfid.

Kaliumhydrosulfid KSH, das bei der Sättigung von Kalilauge mit Schwefelwasserstoff entsteht, kann durch Eindampfen der Lösung im Vakuum in fester Form erhalten werden. Es bildet dann eine kristallinische, stark zerfließliche Masse.

Für die Verbindungen des Kaliums mit Selen, Tellur, Stickstoff, Phosphor und Kohlenstoff (Kaliumkarbid) gelten die entsprechenden Verhältnisse wie beim Natrium.

Kaliumhypochlorit KClO wird entweder bei der Elektrolyse von Chlorkaliumlösung ohne Scheidewand oder beim Einleiten von Chlor in kalte Kalilauge gewonnen. Die wässerige Lösung wurde früher unter dem Namen „Eau de Javelle" als Bleichmittel benutzt.

Kaliumchlorat $KClO_3$. Das Salz entsteht entsprechend wie Natriumchlorat. Es bildet monokline Kristalle vom spezifischen Gewicht 2,344 und dem Schmelzpunkt 370 °. Hydrate des Salzes sind nicht bekannt. Die Löslichkeit steigt entsprechend der negativen Lösungswärme von — 10,0 Cal. mit der Temperatur erheblich an. Sie beträgt bei 20 ° 7,1 g, bei 100 ° 56,0 g in 100 g Wasser.

Das Kaliumchlorat wird hauptsächlich als Oxydationsmittel verwendet. Im Gemisch mit Metallsufiden, besonders Schwefelantimon, dient es zur Herstellung der Zündmasse der schwedischen Zündhölzer. In der Medizin wird es als desinfizierendes Mittel benutzt.

Mit Salzsäure entwickelt Kaliumchlorat Chlor. Beim Erhitzen für sich zerfällt es in Kaliumperchlorat und Chlorid nach der Gleichung $4KClO_3 = 3KClO_4 + KCl$.

Das Perchlorat wird bequemer als auf diesem Wege durch Umsetzung des durch Elektrolyse leicht zu gewinnenden Natriumsalzes mit Chlorkalium gewonnen. Es bildet rhombische farblose Kristalle vom spezifischen Gewicht 2,52 und dem Schmelzpunkte 610 °. Die Löslichkeit wurde bei 25 ° zu 1,96 g, bei 100 ° zu 18,7 g in 100 g Wasser ermittelt.

Das Salz ist in Alkohol praktisch unlös-

lich und wird daher in der Analyse zur gewichtsanalytischen Bestimmung des Kaliums verwendet, da das Natriumsalz in Alkohol löslich ist.

Kaliumhypobromit KOBr bildet sich bei der Einwirkung von Brom auf Kalilauge und wird in der Analyse als Oxydationsmittel benutzt.

Das Bromat $KBrO_3$, das in gleicher Weise wie das Natriumsalz entsteht, bildet Kristalle vom spezifischen Gewicht 3,24 und dem Schmelzpunkt 434 °. Die Löslichkeit beträgt bei 20 ° 6,9 g, bei 100 ° 49,8 g in 100 g Wasser. Beim Erhitzen geht es unter Sauerstoffentwickelung in Bromid über.

Kaliumhypojodit KJO entsteht bei Einwirkung von Jod auf wässerige Kalilauge. Es wird ebenso wie das Hypobromit in der Analyse benutzt. Das Jodat bildet sich durch elektrolytische oder chemische Oxydation von Jodkalium. Es bildet Kristalle vom spezifischen Gewicht 3,89 und dem Schmelzpunkte 560 °.

Beim Einleiten von Chlor in eine Mischung von Kaliumjodat und Kaliumhydroxydlösungen oder durch elektrolytische Oxydation von Jodat wurden Perjodate erhalten, von welchen das normale Salz KJO_4 vom spezifischen Gewicht 3,618 am besten definiert ist.

Kaliumhydrosulfit $K_2S_2O_4$ entspricht nach Gewinnung und Eigenschaften durchaus der Natriumverbindung. Das gleiche gilt für das Sulfit K_2SO_3, von dem auch ein 2- und 1-Hydrat beschrieben ist, sowie für das Bisulfit $KHSO_3$.

Kaliumsulfat K_2SO_4 tritt als Nebenprodukt bei der Darstellung von Salpetersäure aus Kaliumnitrat oder bei der Behandlung von Kaliumchlorid mit Schwefelsäure auf. Im großen wird es vornehmlich aus seinen in den Staßfurter Abraumsalzen vorkommenden Doppelverbindungen mit Magnesiumsalzen, zumal dem schon erwähnten Kainit, einem wasserhaltigen Doppelsalz von Kaliumchlorid mit Magnesiumsulfat, gewonnen, der mit kaltem Wasser unter Abscheidung von Schönit $K_2Mg(SO_4)_2$ reagiert, während Chlormagnesium in Lösung geht. Der Schönit wird sodann mit Chlorkalium entsprechend der folgenden Gleichung weiterbehandelt: $K_2Mg(SO_4)_2 + 2\,KCl = 2\,K_2SO_4 + MgCl_2$.

Das Kaliumsulfat bildet rhombische Kristalle vom spezifischen Gewicht 2,67 und dem Schmelzpunkt von etwa 1050 °. Die Bildungswärme aus den Elementen beträgt 344,6 Cal., die Neutralisationswärme beim Vermischen normaler Lösungen von Kalilauge und Schwefelsäure 15,6 Cal. Hydrate des Salzes sind im Gegensatz zum Natriumsalz nicht bekannt. Die Löslichkeit, die nur langsam mit der Temperatur ansteigt, wurde bei 20 ° zu 11,11 g, bei 100 ° zu 24,1 g in 100 g Wasser ermittelt. Das Salz findet bei der Fabrikation von Alaun sowie von Pottasche und auch als Düngemittel Verwendung.

Beim Erwärmen des Sulfates mit der äquivalenten Menge Schwefelsäure bildet sich das Kaliumhydrosulfat $KHSO_4$, das in Kristallen vom spezifischen Gewicht 2,355 und dem Schmelzpunkte 200 ° gewonnen wurde. Beim Erhitzen über den Schmelzpunkt geht es in Pyrosulfat $K_2S_2O_7$ über, das seinerseits bei weiterem Erhitzen unter Abspaltung von Schwefelsäure sich in Sulfat umwandelt: $K_2S_2O_7 = K_2SO_4 + SO_3$.

Auf dieser Bildung freier Schwefelsäure beruht die Anwendung des Hydrosulfates in der Analyse als Aufschlußmittel schwerlöslicher Oxyde und zum Reinigen von Platingegenständen.

Das Hydrosulfat löst sich leicht in Wasser, bei 20 ° beträgt die Löslichkeit 48,0 g, bei 100 ° 113,6 g in 100 g Wasser. Die wässerige Lösung reagiert stark sauer.

Das Persulfat und Thiosulfat des Kaliums werden entsprechend den Natriumverbindungen gewonnen, besitzen aber keine wesentliche Bedeutung. Das gleiche gilt für das Kaliumnitrit KNO_2, das durch große Zerfließlichkeit und Löslichkeit ausgezeichnet ist. Letztere beträgt bei 15 ° etwa 300 g in 100 g Wasser. Die Lösung reagiert schwach alkalisch.

Von großer praktischer Bedeutung ist dagegen das Kaliumnitrat KNO_3, der Kalisalpeter. Das Salz findet sich in der Natur in Form von Auswitterungen in trockenen Gegenden. In den sogenannten „Salpeterplantagen“ überläßt man kaliumreiche Stoffe wie Holzasche in Gegenwart von Dünger der Einwirkung der Luft. Der Salpeter wird durch Umkristallisieren gereinigt.

Im großen wird die Verbindung durch Umsetzung von Chilesalpeter mit Chlorkalium gewonnen: $NaNO_3 + KCl = KNO_3 + NaCl$. Die Reindarstellung wird durch die hierbei herrschenden Löslichkeitsverhältnisse sehr erleichtert. Während nämlich das bei der Umsetzung entstehende Chlornatrium seine Löslichkeit mit der Temperatur nur wenig ändert, nimmt die Löslichkeit des Kaliumnitrates mit der Temperatur sehr erheblich zu. Aus der heißen Lösung scheidet sich daher zunächst Chlornatrium ab, während nach dem Abkühlen aus der Lösung der Kalisalpeter wegen seiner bei niedrigen Temperaturen geringeren Löslichkeit ausfällt. Durch Auswaschen mit gesättigter Kaliumnitratlösung, welche alle Verunreinigungen aufnimmt, wird das Salz in reinem Zustande erhalten.

Der Kalisalpeter kristallisiert in rhombischen Kristallen, welche bei 126 ° in eine

rhomboedrische Form übergehen. Die Dichte des festen Salzes beträgt 2,092, der Schmelzpunkt liegt bei 340 °.

Die Bildungswärme aus den Elementen beträgt 119,3 Cal., die Neutralisationswärme ergab sich, wie bei allen starken Säuren und Basen, auch bei der Neutralisation von 1 Mol. Salpetersäure und 1 Mol. Kalilauge zu 13,77 Cal. Die Lösungswärme wurde zu — 8,5 Cal. ermittelt. Entsprechend diesem verhältnismässig hohen negativen Werte nimmt die Löslichkeit, wie bereits erwähnt, mit der Temperatur erheblich zu. Sie beträgt bei 0 ° 13,27 g, bei 20 ° 31,6 °, bei 100 ° 246 g in 100 g Wasser. Der Siedepunkt der gesättigten Lösung wurde zu 114 ° bei einem Gehalte von 311 g des Salzes in 100 g Wasser ermittelt. Ein zweiter Siedepunkt der gesättigten Lösung konnte bei Kaliumnitrat bei einer Temperatur von 331 ° in ähnlicher Weise wie beim Natriumchlorat verwirklicht werden.

Aus den Messungen der elektrischen Leitfähigkeit von wässerigen Kaliumnitratlösungen berechnet sich, daß das Salz in 1-normaler Lösung bereits zu 63,6 %, in $^1/_{10}$ normaler Lösung zu 82,8 %, in $^1/_{100}$ normaler Lösung zu 93,4 % dissoziiert ist.

Beim Erhitzen über den Schmelzpunkt gibt der Kalisalpeter Sauerstoff ab und geht dabei in Kaliumnitrit, bei weiterem Erhitzen unter gleichzeitiger Abspaltung von Stickoxyd in Kaliumoxyd über. Die Sauerstoffabgabe des Nitrates beim Erhitzen besitzt besonderes geschichtliches Interesse, da Scheele auf diesem Wege zum erstenmal reinen Sauerstoff hergestellt hat. Infolge der Leichtigkeit der Sauerstoffabspaltung findet Kaliumnitrat als Oxydationsmittel Anwendung. Am bekanntesten ist seine Benutzung im gewöhnlichen Schießpulver. Dieses setzt sich aus Kalisalpeter, Kohle und Schwefel zusammen. Die bei der Verbrennung des Pulvers sich abspielenden chemischen Vorgänge sind sehr verwickelt. Eine angenäherte Vorstellung gibt die Reaktionsgleichung $2KNO_3 + 2C + S = K_2SO_4 + N_2 + 2CO$.

Die Gegenwart des festen Kaliumsulfates bedingt die Rauchbildung, die der Gase die Sprengwirkung. Neben dem Kaliumsulfat ist im Rückstand stets noch unzersetzte Kohle (zum Teil wohl durch Zerfall des Kohlenoxyds in Kohle und Kohlendioxyd gebildet) sowie kohlensaures Kali und Kaliumthiosulfat in dem festen Verbrennungsrückstand vorhanden. Die angewandten Mengenverhältnisse betragen in der Regel etwa 75 Teile Salpeter, 10 Teile Schwefel und 15 Teile Kohle, entsprechen also annähernd der vorher angeführten Gleichung.

Seit der Entdeckung der aus organischen Nitroverbindungen bestehenden rauchschwachen Pulver hat das alte Schwarzpulver erheblich an Bedeutung verloren.

Kaliumnitrat vermag mit Salpetersäure zu den Verbindungen $KNO_3.HNO_3$ und $KNO_3.2HNO_3$ zusammenzutreten.

Die Verbindungen des Kaliums mit den verschiedenen Phosphorsäuren entsprechen in jeder Weise denen des Natriums. Erwähnt sei das Kaliumdihydrophosphat KH_2PO_4, das in doppelt brechenden Kristallen vom spezifischen Gewicht 2,34 und dem Schmelzpunkt 96 ° kristallisiert. Das Trikaliumphosphat K_3PO_4 tritt bei der technischen Verwertung der Thomasschlacken auf. Es entsteht beim Erhitzen von unlöslichen Phosphaten mit Kaliumsulfat und Kohle.

Kaliumkarbonat (Pottasche) K_2CO_3 kann z. B. aus der Asche von Pflanzenteilen, namentlich von Holz, in der es sich in erheblicher Menge findet, durch Auslaugen gewonnen werden. Während früher das Salz als Ausgangsmaterial für die Darstellung anderer Kaliumsalze eine erhebliche Rolle spielte, stellt man heutzutage seit Erschliessung der Kalisalzlager das Karbonat z. B. aus dem Chlorid nach den gleichen Verfahren wie das Natriumkarbonat aus dem Kochsalz, in erster Linie also durch Elektrolyse oder entsprechend dem Leblanc-Verfahren dar.

Das feste Kaliumkarbonat bildet eine weiße Masse vom spezifischen Gewicht 2,29 und dem Schmelzpunkte von etwa 890 °. Die Bildungswärme aus den Elementen beträgt 281,1 Cal., die Neutralisationswärme von 1 Mol. KOH mit der äquivalenten Menge H_2CO_3 ergab sich zu 10,1 Cal.

Von dem Salze sind mehrere Hydrate beschrieben worden. Als wasserreichste Verbindung ist ein 3-Hydrat festgestellt worden. Auch hier tritt also bei Kaliumsalzen ein erheblich geringerer Wassergehalt zutage als bei dem entsprechenden Natriumsalz (10-Hydrat des Natriumkarbonates). Die Löslichkeit beträgt bei 25 ° 113,5, bei 100 ° 156 g in 100 g Wasser. Die wässerigen Lösungen zeigen ebenso wie die der Soda infolge von Hydrolyse stark alkalische Reaktion.

Pottasche findet in der Seifen- und Glasfabrikation, ferner auch bei der Bäckerei, in der Farbenindustrie sowie in der Medizin Verwendung.

Leitet man in die konzentrierte Lösung des Kaliumkarbonates Kohlensäure ein, so bildet sich Kaliumhydrokarbonat $KHCO_3$, das in monoklinen Kristallen vom spezifischen Gewicht 2,17 erhalten wurde. Beim Erhitzen zerfällt das Salz unter Abspaltung von Kohlensäure und Wasser und geht wieder in das normale Karbonat über. Die wässerige Lösung des Hydrokarbonates reagiert gegen Phenolphtalein annähernd neutral. Bei stärkerem Verdünnen tritt

infolge von Hydrolyse gemäß der Gleichung $KHCO_3 + H_2O = KOH + H_2O + CO_2$ alkalische Reaktion auf.

Bei der elektrolytischen Oxydation des Kaliumkarbonats entsteht ein Perkarbonat, das ebenso wie das Natriumsalz schon bei Berührung mit Wasser Sauerstoff abgibt. Es bildet ein weißes Pulver von der Zusammensetzung $K_2C_2O_6$.

Kaliumsilikate und Borate entsprechen nach Bildung und Eigenschaften durchaus den Natriumverbindungen.

Literatur. ***W. Hinrichsen,*** *Kalium. In Abeggs Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II, Teil 1, Leipzig 1908.*

W. Hinrichsen.

d) Rubidium.

Rb. Atomgewicht 85,45.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung. 5. Chemische und physikalische Eigenschaften. 6. Elektrochemie. 7. Analytischer Nachweis. 8. Verbindungen des Rubidiums.

1. Atomgewicht. Das Atomgewicht wurde nach Analyse zu 85,45 ermittelt.

2. Vorkommen. Das Rubidium ist in der Natur außerordentlich weit verbreitet, findet sich aber stets nur in sehr kleinen Mengen als Begleiter anderer Alkalimetalle, zumal des Kaliums. Im Lithiumglimmer (Lepidolith) kommt es in Mengen bis über 1 % vor. Auch die Staßfurter Kalisalze, die Asche mancher Pflanzen und endlich einige Mineralwässer enthalten nachweisbare Mengen des Elementes.

3. Geschichte des Elementes. Das Rubidium wurde im Jahre 1861 von Bunsen und Kirchhoff vermittels der Spektralanalyse gelegentlich der Untersuchung von Dürkheimer Mineralwasser und von Lepidolith aufgefunden, nachdem die gleichen Forscher auf demselben Wege ein Jahr vorher das Cäsium entdeckt hatten. Das Rubidium erhielt seinen Namen auf Grund einer besonders charakteristischen roten Spektrallinie (Rubidus = dunkelrot).

4. Gewinnung von Rubidiumverbindungen. Bei der Herstellung von Kaliumchlorid aus Karnallit der Staßfurter Abraumsalze reichert sich das Rubidium als Rubidiumkarnallit $MgRbCl_3$ an. Aus der Lösung kann es in Form von Rubidiumalaun $AlRb(SO_4)_2$ gefällt werden. Um das Element vollständig von den nächstverwandten Alkalimetallen, dem Kalium und Cäsium, zu trennen bedient man sich entweder der Alaune oder der Platinchloriddoppelsalze. Da von diesen die Löslichkeit recht verschieden ist — z. B. werden bei gewöhnlicher Temperatur die Löslichkeiten des Kaliumalauns zu 13,5 g, des Rubidiumalauns zu 2,27 g, des Cäsiumalauns zu 0,619 g in 100 g Wasser angegeben, — so ist die Trennung mittels fraktionierter Kristallisation durchführbar. Das Kaliumsalz hat stets die größte, die Cäsiumverbindung die kleinste Löslichkeit der Reihe.

5. Darstellung des metallischen Rubidiums. Zur Gewinnung des Metalles dienen entsprechende Verfahren wie beim Natrium, z. B. die Einwirkung von Kohle auf Rubidiumkarbonat oder die Elektrolyse von geschmolzenem Rubidiumchlorid. Am meisten empfohlen wird die Zersetzung von Rubidiumhydroxyd durch metallisches Magnesium im Wasserstoffstrome. Das Metall destilliert ab und wird unter flüssigem Paraffin aufgefangen.

6. Chemische und physikalische Eigenschaften des Rubidiums. Das Metall besitzt silberweiße Farbe, die glänzenden frischen Schnittflächen laufen aber an der Luft sofort an. Nächst dem Cäsium ist es das weichste Metall, das auch bei —10° seine wachsweiche Beschaffenheit noch nicht einbüßt. Das spezifische Gewicht beträgt 1,52, woraus sich ein Atomvolumen von 55,8 berechnet, das also größer ist als das des Kaliums. Der Schmelzpunkt liegt bei etwa 38°, der Siedepunkt wurde bei Atmosphärendruck zu 696° ermittelt. Der Dampf weist blaue, ins grünliche spielende Farbe auf. In den meisten Eigenschaften ähnelt das Element durchaus dem Kalium, was auch mit seiner Stellung im periodischen System übereinstimmt.

7. Elektrochemie des Rubidiums. Das Rubidium ist einwertig wie die übrigen Alkalimetalle und besitzt noch größere Elektropositivität als das Kalium. Dem entspricht die hohe Ionisierungswärme, die zu + 62,6 Cal. berechnet worden ist. Die meisten Salze besitzen daher auch größere Löslichkeit als die entsprechenden Kaliumverbindungen. Nur die Salze mit den stärksten Anionen (Nitrat, Chlorat, usw.) zeigen das umgekehrte Verhalten („Inverse Löslichkeitsreihen"). Entsprechend der großen Ionisierungstendenz ist die Fähigkeit zur Komplexbildung, daher auch der Kristallwassergehalt der festen Salze sehr gering. Das Rubidium-Ion ist farblos.

7. Analytischer Nachweis des Rubidiums. Qualitativ wird das Element am besten mittels der Spektralanalyse nachgewiesen. Am deutlichsten ist eine sehr helle Linie im Rot ($\lambda = 779,9$), zwei Linien im Rotgelb ($\lambda = 629,9$ und 620,6) und zwei Linien im Blau ($\lambda = 421,5$ und 420,27). Auf diesem Wege können noch 0,0003 mg des Elementes nachgewiesen werden. Zur quantitativen Bestimmung dienen die schon erwähnten schwer löslichen Salze. Die Wägung erfolgt am besten als Chlorid oder Sulfat.

Rubidiumsalze sind zum Teil giftig.

8. Verbindungen des Rubidiums. Rubidiumhydrid RbH bildet sich aus den Elementen. Die Verbindung, die ein spezifisches Gewicht von etwa 2 besitzt, reagiert sehr lebhaft, z. B. mit Halogenen schon bei gewöhnlicher Temperatur. Beim Erhitzen im Vakuum zerfällt sie in ihre Bestandteile.

Rubidiumfluorid RbF wird beim Neutralisieren des Karbonats mit Flußsäure erhalten. Es bildet wasserfreie Kristalle, die leicht löslich sind und bei etwa 760° schmelzen.

Rubidiumchlorid RbCl kristallisiert in wasserfreien Würfeln vom spezifischen Gewicht 2,21 und dem Schmelzpunkte 710°. Die Lösungswärme beträgt —4,5 Cal., die Löslichkeit steigt daher mit der Temperatur an. Sie beträgt bei 20° 91,1, bei 100° 138,9 g in 100 g Wasser. In Alkohol ist es im Gegensatz zu Chlornatrium und Chlorkalium löslich. Die aus Gefrierpunktserniedrigungen wässeriger Lösungen berechneten Dissoziationsgrade zeigen geringere Abweichungen vom Ostwaldschen Verdünnungsgesetze als die anderen Alkalimetalle mit niedrigerem Atomgewicht.

Rubidiumbromid RbBr bildet ebenfalls farblose Würfel vom spezifischen Gewicht 2,78 und dem Schmelzpunkt 683°. Die Löslichkeit bei 16° wurde zu 105 g in 100 g Wasser ermittelt. Der Wert ist also höher als beim Bromkalium.

Rubidiumjodid RbJ kristallisiert in farblosen Würfeln vom spezifischen Gewicht 3,44 und dem Schmelzpunkt 642°. Die Löslichkeit bei 17,4° ergab sich zu 153 g in 100 g Wasser.

Alle Halogenverbindungen des Rubidiums vermögen weiteres Halogen unter Bildung komplexer Halogenide aufzunehmen.

Rubidiumhydroxyd RbOH ist noch stärker basisch als das Kaliumhydroxyd. Die Verbindung wird zweckmäßig aus dem Sulfat durch Umsetzung mit Bariumhydroxyd gewonnen.

Von Oxyden des Rubidiums sind mehrere beschrieben worden. Die Zusammensetzung schwankt von Rb_2O bis Rb_2O_4. Auch von Sulfiden sind mehrere bekannt. Als schwefelreichste Verbindungen ist ein Hexasulfid angegeben. Stickstoff- und Phosphorverbindungen des Rubidiums entsprechen denen des Kaliums.

Rubidiumchlorat $RbClO_3$ und Rubidiumperchlorat $RbClO_4$ zeichnen sich durch geringere Löslichkeit als die entsprechenden Kaliumsalze aus. Die Löslichkeit des Chlorats beträgt bei 19° 5,1 g, die des Perchlorats bei 21,3° 1,1 g in 100 g Wasser.

Rubidiumsulfat Rb_2SO_4 bildet mit Kaliumsulfat isomorphe Kristalle vom spezifischen Gewicht 3,6 und dem Schmelzpunkt 1074°. Die Löslichkeit wurde bei 20° zu 48,2 g, bei 100° zu 81,8 g in 100 g Wasser ermittelt.

Die Doppelsalze (Alaune) der Verbindung mit Aluminium- und Eisensulfat zeichnen sich durch hervorragende Kristallisationsfähigkeit aus. Auch ein Hydrosulfat $RbHSO_4$ ist beschrieben, das beim Glühen in Pyrosulfat übergeht. Beim Erhitzen im Ammoniakstrom bildet es dagegen neutrales Salz, was z. B. bei der analytischen Bestimmung des Rubidiums als Sulfat zu beachten ist.

Rubidiumnitrat $RbNO_3$ entspricht in seinem Verhalten dem Kaliumnitrat. Es kommt in verschiedenen Kristallformen vor. Die Löslichkeit steigt sehr stark mit der Temperatur an. Bei 20° wurde der Wert 53,3 g, bei 100° 452 g in 100 g Wasser gefunden. Der Siedepunkt der gesättigten Lösung mit einem Gehalte von 617 g in 100 g Wasser liegt bei 118,23°. Die aus den Gefrierpunktserniedrigungen der wässerigen Lösungen abgeleiteten Dissoziationsgrade weichen nur wenig vom Ostwaldschen Verdünnungsgesetze ab. Diese Eigenschaft, die beim Cäsium noch stärker ausgeprägt ist, und die im Gegensatz zu den übrigen starken Elektrolyten steht, hängt nach Biltz mit der großen Elektroaffinität und dementsprechend der geringen Komplexbildung der Rubidium-, Cäsium- und Nitrationen zusammen.

Die Phosphate und Arsenate entsprechen den Kaliumsalzen.

Rubidiumkarbonat Rb_2CO_3 schmilzt bei 840°. Das wasserfreie Salz ist leicht zerfließlich und löst sich unter starker Wärmeentwickelung leicht in Wasser. Die wässerige Lösung reagiert stark alkalisch. Sättigt man die Lösung mit Kohlensäure, so kann man das Hydrokarbonat $RbHCO_3$ gewinnen, das sich ebenfalls in Wasser leicht löst und in seinen Eigenschaften dem Natriumsalz entspricht. Durch elektrolytische Oxydation der Kabonatlösung wurde ein dem Kaliumperkarbonat entsprechendes Rubidiumperkarbonat dargestellt.

Literatur. *W. Hinrichsen, Rubidium. In Abeggs Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II, Teil 1, Leipzig 1908.*

W. Hinrichsen.

e) Cäsium.

Cs. Atomgewicht 132,81.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung. 5. Chemische und physikalische Eigenschaften. 6. Elektrochemie. 7. Analytische Chemie. 8. Verbindungen des Cäsiums.

1. Atomgewicht. Das Atomgewicht des Elementes wurde durch Analyse des Chlorides in guter Uebereinstimmung mit dem aus der Atomwärme berechneten Werte und der Stellung des Elementes im periodischen System zu 132,81 festgestellt.

2. Vorkommen. Das Cäsium findet sich in der Natur nur in sehr geringer Menge gemeinsam mit den anderen Alkalimetallen. Spurenweise kommt es in vielen Mineralwässern und in den Staßfurter Abraumsalzen vor. Reich an Cäsium ist nur ein zuerst in Elba entdecktes, später auch in Amerika aufgefundenes Mineral „Pollux", das aus Cäsium-Aluminiumsilikat besteht.

3. Geschichte. Das Element war das erste, das von Bunsen und Kirchhoff mittels der Spektralanalyse bei der Untersuchung der Mutterlauge der Dürkheimer Solquellen entdeckt wurde (1860). Der Name stammt vom lateinischen caesius = himmelblau und ist auf die Anwesenheit zweier charakteristischer blauer Linien im Spektrum zurückzuführen.

4. Gewinnung der Cäsiumverbindungen. Zum Zwecke der Reindarstellung von Cäsiumverbindungen benutzt man die fraktionierte Kristallisation der bereits beim Rubidium erwähnten schwerlöslichen Doppelsalze. Außer den Alaunen und den Platinchlorid-Doppelverbindungen wurden zu diesem Zweck auch die Doppelsalze des Cäsiumchlorides mit Zinnchlorid, Bleitetrachlorid und Antimonchlorür empfohlen. Vom Rubidium läßt sich das Element über die Karbonate trennen, von denen das Cäsiumsalz in Alkohol leicht, das Rubidiumkarbonat schwer löslich ist.

5. Darstellung des Elementes. Die Gewinnung des metallischen Cäsiums auf elektrolytischem Wege ist schwierig. Bequemer stellt man das Metall durch Erhitzen des Hydroxydes oder Karbonates mit Magnesium im Wasserstoffstrome dar, wobei das Cäsium abdestilliert.

6. Chemische und physikalische Eigenschaften des Cäsiums. Das Element ähnelt dem Kalium und Rubidium. Es besitzt silberweiße Farbe, oxydiert sich aber augenblicklich an der Luft. Seine Härte ist noch geringer als die des Rubidiums, das Cäsium ist daher das weichste Metall. Der Schmelzpunkt liegt bei 26,5° der Siedepunkt bei 670°. Vergleicht man die Schmelz- und Siedepunkte der Alkalimetalle miteinander, so erhält man folgende Reihe:

Name:	Li:	Na:	K:	Rb:	Cs:
Schmelzpunkt	177,8°	97,6°	62,5°	38°	26,5°
Siedepunkt	$>$ 1400°	877,5°	750°	696°	670°

Mit steigendem Atomgewicht sinkt also Schmelz- und Siedepunkt.

Das spezifische Gewicht beträgt 1,87. Hieraus berechnet sich das Atomvolumen des Elementes zu 71. Der Vergleich der spezifischen Gewichte und Atomvolumina führt zu folgender Aufstellung:

Name:	Li:	Na:	K:	Rb:	Cs:
Spez. Gewicht	0,594	0,978	0,862	1,52	1,87
Atomvolumen	11,8	23,7	45,4	55,8	71

Die Atomvolumina steigen also mit zunehmendem Atomgewicht regelmäßig an. Das Cäsium besitzt nicht nur in der Reihe der Alkalimetalle, sondern überhaupt unter allen Elementen das höchste Atomvolumen. Mit diesem hängt auch die außerordentlich große Kompressibilität des Metalles zusammen.

Die spezifische Wärme des Metalles wurde zwischen 0 und 26° zu 0,04817 ermittelt, woraus sich die Atomwärme 6,4 berechnet.

Cäsium reagiert äußerst heftig mit Luft und Wasser. Bei reiner Oberfläche tritt Umsetzung selbst mit vollständig trockenem Sauerstoff schon bei gewöhnlicher Temperatur unter Flammenerscheinung ein. Die Flamme zeigt rotviolette Färbung.

7. Elektrochemie des Cäsiums. Cäsium ist einwertig und das stärkst elektropositive Element. Seiner außerordentlich großen Ionisierungstendenz entspricht die Leichtlöslichkeit der meisten Cäsiumsalze. Anders verhalten sich nur wie beim Rubidium die Verbindungen mit besonders starken Aionen („Inverse Löslichkeitsreihen"). Die geringe Neigung zu Komplexbildung tritt auch hier in dem niedrigen Wassergehalt der Salze, besonders aber darin hervor, daß das Cäsiumnitrat, welches die stärkst elektroaffinen Ionen enthält, in seinen Dissoziationsverhältnissen dem Ostwaldschen Verdünnungsgesetze entspricht, was auf fehlende Hydratation der Ionen zurückgeführt werden kann. Das Cäsiumion ist farblos.

7. Analytischer Nachweis des Cäsiums. Der qualitative analytische Nachweis des Elementes erfolgt am besten mittels der Spektralanalyse. Von den Spektrallinien sind zwei rote (λ = 697,4 und 672,2), drei orange bis gelbe (λ = 659,0, 635,4 und 621,3), eine gelbgrüne (584,5), eine grüne (566,4) und zwei blaue Linien von der Wellenlänge 459,3 und 455,5 hervorzuheben.

Der spektralanalytische Nachweis gestattet noch die Erkennung von 0,000005 mg. Zur quantitativen Bestimmung eignen sich besonders die vorher genannten Doppelsalze, das Chlorid oder das Sulfat.

9. Verbindungen des Cäsiums. Die Salze des Cäsiums entsprechen durchaus denen des Kaliums und Rubidiums.

Das Hydrid CsH besitzt die Dichte 2,7.

Das Chlorid CsCl kristallisiert in kleinen Würfeln vom spezifischen Gewicht 3,97 und dem Schmelzpunkt von etwa 630 °. Das Salz ist leicht flüchtig und hygroskopisch, im Wasser löst es sich leicht. Die Löslichkeit

steigt entsprechend der negativen Lösungswärme von 4,8 Cal. mit der Temperatur an. Sie beträgt bei 20° 186,5 g, bei 119,4°, dem Siedepunkte der gesättigten Lösung 290,0 g in 100 g Wasser. Die wässerige Lösung reagiert neutral. Die aus den Gefrierpunktserniedrigungen der wässerigen Lösungen berechneten Dissoziationsgrade zeigen unter sämtlichen Alkalichloriden die geringsten Abweichungen vom Ostwaldschen Verdünnungsgesetz.

Cäsiumbromid CsBr bildet farblose Würfel vom spezifischen Gewicht 4,38.

Das Jodid CsJ wird in Kristallen vom spezifischen Gewicht 4,51 und dem Schmelzpunkt 621° erhalten. Die Löslichkeit wurde bei 35,6° zu 106 g in 100 g Wasser ermittelt.

Die Halogenide des Cäsiums besitzen giftige Eigenschaften und sind wie die des Rubidiums in besonders hohem Maße zur Bildung von Polyhalogeniden z. B. CsJ_5 befähigt.

Das Hydroxyd CsOH ist die stärkste bekannte Base. Die feste Verbindung ist sehr zerfließlich und erhitzt sich stark mit Wasser.

Von Oxyden des Cäsiums sind ebenso wie beim Rubidium alle Stufen vom Monoxyd Cs_2O bis zum Tetroxyd Cs_2O_4 beschrieben.

Cäsiumsulfat Cs_2SO_4 bildet rhombische Kristalle vom spezifischen Gewicht 4,24 und dem Schmelzpunkte 1019°. Entsprechend der negativen Lösungswärme von etwa — 5 Cal. steigt die Löslichkeit mit der Temperatur an. Sie beträgt bei 20° 178,7 g, bei 108,6°, dem Siedepunkt der gesättigten Lösung, 224,5 g in 100 g Wasser.

Cäsiumnitrat $CsNO_3$ beansprucht wegen der bereits erwähnten Beziehung zum Ostwaldschen Verdünnungsgesetz besonderes Interesse. Es wird in Kristallen vom spezifischen Gewicht 3,687 und dem Schmelzpunkt 414° erhalten und ist mit den entsprechenden Rubidium- und Kaliumsalzen isomorph. Die Löslichkeit beträgt bei 20° 23,0 g, bei 106,2° dem Siedepunkt der gesättigten Lösung, 22,3 g in 100 g Wasser. Während die aus den Gefrierpunkterniedrigungen der wässerigen Lösungen berechneten Dissoziationsgrade dem Ostwaldschen Verdünnungsgesetze genau gehorchen und eine Dissoziationskonstante von etwa 0,34 liefern, ist das gleiche mit den aus Leitfähigkeitsmessungen bestimmten Werten nicht der Fall. Vielmehr zeigt hier die Konstante einen Gang.

Cäsiumkarbonat Cs_2CO_3 bildet wasserhaltige Kristalle, die beim Erhitzen in ihrem Kristallwasser schmelzen und das anhydrische Salz als sandige, stark hygroskopische Masse zurücklassen. Beim Erhitzen im Vakuum spaltet es verhältnismäßig leicht Kohlensäure ab. In Wasser löst es sich unter starker Wärmeentwickelung, die wässerige Lösung reagiert infolge von Hydrolyse stark alkalisch.

Durch die Leichtlöslichkeit des Salzes in Alkohol kann Cäsium von den anderen Alkalimetallen getrennt werden. Die Löslichkeit beträgt bei 19° 11,1 g, beim Siedepunkt des Alkohols 20,1 g Karbonat in 100 g Alkohol.

Literatur. *W. Hinrichsen, Cäsium. In Abeggs Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II, Teil 1, Leipzig 1908.*

W. Hinrichsen.

f) Kupfer.

Cuprum. Cu. Atomgewicht 63,57.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung. Galvanostegie und Galvanoplastik. 5. Formarten und allotrope Modifikationen. 6. Verbindungen und Legierungen. 7. Elektrochemie. 8. Analytische Chemie. 9. Spezielle Chemie. Die wichtigsten Silberverbindungen. 10. Thermochemie. 11. Photochemie. 12. Kolloidchemie.

1. Atomgewicht. 63,57 (Internationale Atomgewichts-Kommission 1912). Gründe für die Wahl eines Wertes von etwa 64: Für ein Element vom halben Atomgewicht wäre im periodschen System (s. Artikel „Chemische Elemente") kein Platz zwischen $P_{(V)}$ und $S_{(VI)}$; dagegen reiht Cu sich sehr gut in Reihe 4 der Gruppe I ein. Cu ist isomorph mit Ag und Au; Verbindungen der Cuproreihe sind oft mit Verbindungen des einwertigen Au oder Ag, Verbindungen der Cuprireihe mit Verbindungen des zweiwertigen Mg, Mn, Fe, Ni, Co und V isomorph; die Atomwärme des metallischen Cu wird 5,9 bis 6,0 bei Annahme des Atomgewichts-Werts etwa 64.

Aelteste Atomgewichts-Bestimmung: Proust und Chevenix fanden, daß 25 Teile Sauerstoff 100 Teilen Kupfer äquivalent sind; hieraus berechnete Wollaston für Cu den Wert 64 (auf O = 16 bezogen). Berzelius glühte das Carbonat und reduzierte das Oxyd durch Wasserstoff; er fand Cu = 63,30. Die besten Bestimmungen führte Th. W. Richards aus: Reinstes $CuBr_2$ wird mit $AgNO_3$ gefällt, oder in $CuSO_4$ übergeführt und aus diesem das Cu elektrolytisch abgeschieden; oder es wird durch gewogene Cu-Mengen Ag aus $AgNO_3$ niedergeschlagen; die nach Richards' Ansicht zuverlässigsten Bestimmungen ergaben die Werte 63,589, 63,578, 63,573 und 63,572.

2. Vorkommen. a) Metallisch (meist sehr rein); Fundstätten: Vereinigte Staaten (Lake superior u. a.), Chile, Ungarn, England, Skandinavien, Ural usw.; b) in Verbindungen, als: Cu_2O Rotkupfererz (Cuprit), Fundstätten: New Mexico, Arizona u. a.; CuO

Schwarzkupfererz (Melaconit), Fundstätten: Vereinigte Staaten; $CuCO_3.Cu(OH)_2$ Malachit, Fundstätten: Ural, Chile, New Mexico, Arizona u. a.; $2CuCO_3.Cu(OH)_2$ Kupferlasur (Azurit), Fundstätten: Lyon, Ural, Sibirien; Cu_2S Kupferglanz (Chalcosin) häufig in Nordamerika; CuS Kupferindig, Fundstätten: Chile, Bolivia, Peru; $Cu_2S.Fe_2S_3$ Kupferkies (Chalkopyrit), mit Pyrit zusammen häufig, Fundstätten: Deutschland (Harz), Skandinavien, England, Nordamerika u. a. $3Cu_2S.Fe_2S_3$ Buntkupfererz (Bornit), Fundstätten: Mansfeld, Montana, Cornwall, Chile; $CuCl_2.3CuO.4H_2O$ Atakamit, Fundstätten: Chile, Peru (Wüste Atakama). Ferner gibt es noch mehrere seltene Cu-Mineralien. In Meteoriten ist Cu gefunden worden; seine Anwesenheit in der Photosphäre der Sonne ist spektroskopisch erwiesen.

In kleinen Mengen findet sich Cu im Urgestein, in den Dolomiten, in Mineralwässern, in Pflanzen; Kartoffeln enthalten 0,0018 g, Brot 0,0015 bis 0,0044 g, Kakao 0,012 bis 0,029 g pro kg. Die tägliche Nahrung des Menschen enthält zirka 1 mg Cu. Manche Pflanzen, z. B. Alsine verna, gedeihen nur auf Cu-reichem Boden. Der menschliche und der tierische Organismus enthalten (z. T. wegen des Cu-Gehalts der Pflanzennahrung) geringe Cu-Mengen. Im Blut der Mollusken spielt das Cu-haltige Hämocyanin die Rolle des Fe-haltigen Hämoglobins im roten Blute.

Physiologische Wirkung von Cu-Verbindungen. Cu-Salzlösungen wirken toxisch und zwar paralysierend und atmungshemmend; am stärksten bei subkutaner bezw. intravenöser Einführung. Die grüne Farbe von Gemüsekonserven (Erbsen usw.) wird oft durch Zusatz von Cu-Salzen intensiver und dauerhafter gemacht; es bilden sich dabei wahrscheinlich Cu-Chorophyllverbindungen. 120 mg Cu pro Tag sollen unschädlich sein; Durch größeren Konsum von gefärbten Konserven kann die Aufnahme aber auf 300 mg steigen. Cu-Salze werden gegen Pilze beim Kartoffel- und Weinbau verwendet ($CuSO_4 + Ca(OH)_2$ in Aufschlemmung; d. h. also kolloides $Cu(OH)_2$; die geringe $Cu^{\cdot\cdot}$-Konzentration (s. unter 7 „Elektrochemie") ist für höhere Pflanzen unschädlich).

3. Geschichte. Der Steinzeit, in der von Metallen die gediegen vorkommenden Elemente Au, Ag und Cu bekannt waren, folgte eine Kupferzeit, nachdem man etwa 5000 v. Ch. gelernt hatte, Kupfer- und Kupfererzlagerstätten am Sinai, in Aethiopien usw. auszubeuten. Etwa 1500 v. Ch. entdeckte man die reichen Cu-Lager auf Cypern; aus den Bezeichnungen *χαλκός κύπριος* und aes cyprium sind die Namen cuprum und Kupfer entstanden. Die Verarbeitung spanischer und italischer Cu-Erze und die Bearbeitung des Cu-Metalls waren zu Plinius' Zeiten bereits sehr entwickelt. Lapis (Cu-Polysilikat) ist schon frühzeitig als Malerfarbe, CuO von den Griechen, CuS von den Phönizieren in der Glasindustrie verwendet worden. In Deutschland begann im Jahre 1200 der Abbau des Mansfelder Kupferschiefers; um 1500 war der Hüttenprozeß an verschiedenen Orten eingeführt. In England baute man um 1700 die ersten Flammöfen; in Nordamerika ist die Produktion erst seit 1840 erheblich. Die Alchymisten nannten das Cu Venus (und bezeichneten es mit deren Symbol ♀) oder meretrix metallorum (wegen seiner leichten Angreifbarkeit). Basilius Valentinus (?) schied aus Cu-haltigen Lösungen durch Fe das Cu als sogenanntes „Zementkupfer" ab; er glaubte an eine Verwandlung des Fe in Cu; die richtige Erklärung des Zementationsprozesses gaben van Helmont und Boyle.

Nach der Entdeckung des Zinns lernte man bald (frühestens um 2850 v. Ch., wahrscheinlich erst erheblich später) die Herstellung von Bronze (aes Brundusinum?) kennen; von nun an datiert die Bronzezeit, die sich bis ins Mittelalter erstreckte; denn die Eisengewinnung war im Altertum eine ziemlich geringfügige, und man vermochte auch nur das weiche Schmiedeeisen herzustellen; erst im Mittelalter lernte man bessere Verhüttungsmethoden für Eisenerze sowie die Herstellung des Stahles kennen. Gegenwärtig ist das Cu als Material für Gebrauchsgegenstände usw. stark in den Hintergrund getreten, da das Fe oder der Stahl sich als das weit überlegenere Material für Werkzeuge, Maschinen, Träger für Bauwerke aller Art, Waffen usw. erwiesen hat, und da ferner die Fortschritte der Keramik das kupferne Haus- und Küchengerät ziemlich verdrängt haben; trotzdem ist die Bedeutung des Cu (und seiner Legierungen) wegen seiner besonders im Vergleich zu Eisen sehr viel größeren Beständigkeit sowie wegen seiner großen elektrischen Leitfähigkeit eine ganz beträchtliche.

4. Darstellung. 1. Nichtelektrische Methoden. a) Trockene Methoden. Gediegenes Cu, seine Oxyde und Carbonate werden gemahlen, abgeschlämmt und dann durch Kohle reduziert, verschlackende Zusätze (CaO usw.) beseitigen die Verunreinigungen, bes. die Reste der Gangart.

Sulfidische Erze werden mit Koks oder Holzkohle geschmolzen; der unter der leichtflüssigen Schlacke sich absetzende „Kupferstein" enthält Cu_2S, FeS, Sulfide von Pb, As, Sb, Ag, Au usw.; beim „Rösten dieses Produktes entsteht Fe_2O_3, während das Cu_2S wenig verändet wird; durch Verschmelzen des „Röstgutes" im Schachtofen unter Zusatz von Koks und von quarzreichem Zuschlag

wird das Fe_2O_3 reduziert und in Ferrosilikatschlacke übergeführt; der vorwiegend aus Cu_2S bestehende „Konzentrationsstein" wird dem Ofen entnommen, nochmals geröstet, wobei ein Teil des Cu_2S in CuO bezw. $CuSO_4$ übergeht, und dann im Flammofen eingeschmolzen; hierbei vollzieht sich die Abscheidung des „Schwarzkupfers" nach den Gleichungen

$$Cu_2S + 2CuO \rightarrow 4Cu + SO_2 \text{ bezw. } Cu_2S + CuSO_4 \rightarrow 3Cu + 2SO_2$$

Das „Schwarzkupfer" läßt sich durch Wiederholung des Schmelzprozesses ziemlich weitgehend reinigen; das entstandene „Garkupfer" wird durch Umrühren mittels eines nassen Pfahles „gepohlt", wobei die Reste von Sauerstoff und noch vorhandenes Schwefeldioxyd beseitigt werden. Zur Entfernung der metallischen Verunreinigung, insonderheit zur Gewinnung der Edelmetalle, unterwirft man das Garkupfer einem elektrolytischen Prozeß. Es sei bemerkt, daß die geschilderte Methode der Natur der Rohmaterialien entsprechend oft erheblich modifiziert werden muß.

b) Nasse Methoden. Die Erze werden (eventuell nach vorhergehendem Verwitternlassen, Rösten, chlorierendem Rösten [unter Zusatz von NaCl] usw.) durch H_2SO_4, HCl, $FeCl_2$, $FeSO_4$ + NaCl oder desgleichen gelöst; aus den Laugen wird das Cu durch Fe-Abfälle niedergeschlagen („Zementation") bezw. elektrolytisch gewonnen. Die Laugen werden auf Edelmetalle, As, Sb usw. verarbeitet.

2. Elektrische Methoden. Diese dienen nicht zur Verarbeitung der Rohmaterialien, sondern zur Reinigung von Garkupfer usw. sowie zur Abscheidung des Cu beim nassen Verfahren (s. oben). Bei der elektrolytischen Cu-Raffination wird das zu reinigende Cu als Anode, ein Blech von sehr reinem Cu als Kathode verwendet; die Badspannung wird sehr niedrig gehalten, wodurch man erreicht, daß unedlere Metalle nicht zur Abscheidung gelangen (s. unter 7 „Elektrochemie"), während die Edelmetalle nicht gelöst werden und sich im Anodenschlamm absetzen.

Das reinste Cu des Handels sind das Elektrolytkupfer (99,8%) und das Feinkupfer (Raffinad) (99,6%); Werkkupfer, Zementkupfer usw. enthalten wechselnde, bei letzterem bis auf 30% steigende Mengen von Verunreinigungen.

Galvanostegie und Galvanoplastik. Die elektrolytischen Abscheidungsformen des Cu sind je nach Stromdichte, Konzentration, Säuregehalt und Temperatur kristallinisch, grobkörnig, staubförmig, gleichmäßig zusammenhängend; die Farbe variiert zwischen hellrot bis schwarz; als Verunreinigungen kommen vornehmlich Cu_2O und H_2 in Betracht. Lösungen von 150 g $CuSO_4.5H_2O$ und 50 g H_2SO_4 pro Liter liefern bei 40° und einer Stromdichte von 0,01 Ampère pro 1 qcm sehr glatte, feste und zähe Kathoden-Niederschläge von Cu; ein kleiner Gehalt von Chloriden ist günstig; organische Verunreinigungen wirken äußerst schädlich. In der Galvanostegie (s. unter 7 „Elektrochemie") benutzt man meist Lösungen von Cyankupfer in Cyankaliumlösung; Eisen, Zink, Kohle usw. lassen sich leicht mit einer glatten Cu-Schicht, überziehen; oft dient die elektrolytische Verkupferung nur als Zwischenoperation bei der galvanischen Vernickelung, Versilberung oder Vergoldung.

Die Galvanoplastik verwendet 20 bis 22% $CuSO_4$-Lösungen mit 2 bis 3prozentiger freier Schwefelsäure; der aus solchen Lösungen elektrolytisch abgeschiedene Niederschlag dringt in alle Fugen der Kathode ein und läßt sich nach Erreichung einer gewissen Dicke als zusammenhängendes Gebilde abnehmen; darauf beruht die Herstellung „galvanoplastischer" Nachbildungen, sogenannter „Galvanos", von reliefartigen Gegenständen. Diese (z. B. Holzschnitte) werden erst in Guttapercha, Gips oder dergleichen abgeformt, die erhaltene „Matrize" (das „Negativ") durch Einreiben mit Graphit elektrisch leitend gemacht und als Kathode in einen mit geeigneter Kupfervitriollösung (s. z. B. oben) gefüllten Elektrolysiertrog gebracht, dessen Anode aus metallischem Cu besteht, damit die Lösung ihren Cu-Gehalt nicht ändert. Kupferspiegel lassen sich auf chemischem Wege, durch Reduktion von $CuCl_2$-Lösungen mittels aromatischer Hydrazine, herstellen. Cu ist in Vakuum kathodisch zerstäubbar (siehe den Artikel „Kathodenstrahlen").

5. Formarten und allotrope Modifikationen, deren physikalische Eigenschaften und Konstanten. Cu kristallisiert regulär (in Hexakisoktaedern oder Oktaedern), es schmilzt bei 1084° und soll bei 2100° sieden; im hohen Vakuum läßt es sich sublimieren. Beim Schmelzen an der Luft bildet sich Cu_2O, das sich im Cu löst. Allotrope Modifikationen des Cu sind nicht mit Sicherheit bekannt; das aus Cu-Acetat durch Elektrolyse gewinnbare „allotrope", sehr spröde, bronzefarbene Cu ist eine feste Lösung von Essigsäure in Cu.

Dichte: reines Elektrolytkupfer d_4^{15} 8,9587; destilliertes (ungepreßtes) Cu d_4^{20} 8,9326. Härte 3 nach der Mohs'schen Skala. Eindringungswiderstand 74 (Pb 5,7; Ag 59; Stahl 107—232). Kompressibilität: zwischen 100—500 Atmosphären beträgt die mittlere elastische Volumänderung pro Atmosphäre $0,54.10^{-6}$. Dehnbarkeit sehr groß. Elasti-

zitätsmodul 12500 kg pro qmm bei 16°. Längsdilatation 0,7123.10^{-6} pro kg. Zugfestigkeit 34,6 kg pro 1 qmm Querschnitt; wird durch geringe Mengen von As, Sb und Si wesentlich erhöht. Spezifische Wärme: Mittlerer Wert zwischen —190° und +17°: 0,0796; zwischen 17° und 247°: 0,097. Linearer Ausdehnungskoeffizient zwischen 0° und 100° zirka 1680.10^{-8}. Wärmeleitung in C.G.S.-Einheiten und g-cal bei 15°: 0,895; bei 75: 0,906. Schmelzwärme zirka 40 g cal pro g. Magnetisches Verhalten: diamagnetisch. Elektrische Leitfähigkeit: spezifische Leitfähigkeit 0,5999.10^6 reziproke Ohm für den Würfel von der Kantenlänge 1 cm; Aenderung des spezifischen Widerstandes mit der Temperatur:

t°(C)	Sp. Wid. (abs. elektromagnetische Einheiten)
— 189	302
+ 0	1577
+ 25	1759
100	2249
400	4093

Durch Verunreinigungen wird die Leitfähigkeit stark vermindert. Thermoelektrisches Verhalten: ziemlich stark negativ. Farbe: Oberflächenfarbe rosa bis gelbrot; bei Cu_2O-Gehalt purpur; die gewöhnliche braunrote „Kupferfarbe" ist durch oberflächliche Oxydation und Schwefelung bedingt. Durchlaßfarbe grünblau. Im Ultrarot selektive Absorption. Emission grünlich. Cu-Dampf absorbiert im Blau, ist durchlässig für Grün. Refraktion: $N_{Rot} = 0,58$; $N_D = 0,64$.

Molargewicht: in Hg, Sn und Pb 1atomig; in Bi und Cd 1 bis 2atomig. Absorption: Cu absorbiert oberhalb 400° geringe Mengen von H_2. Lösungen: wichtig sind nur die im folgenden Abschnitt kurz besprochenen Legierungen.

6. Verbindungen und Legierungen mit anderen Metallen (vgl. den Artikel „Legierungen"). Cu ist mit Sb, Al, Bi, Cd, Pb, Sn, Zn in jedem Verhältnis mischbar; ferner gibt es Legierungen mit Fe, Cr, Ni, Mo, U, Ti u. a.; Verbindungen liefert es mit Al, Sb, Cd, Zn, Sn, Ni. Die Legierungen besitzen oft erheblich größere Härte, Festigkeit und chemische Widerstandfähigkeit als das Cu. Dagegen sind sie weniger geschmeidig.

Die Cu-Zn-Legierungen heißen Messing, und zwar Rotmessing (100 bis 80 % Cu) dazu gehören: Pinchbeak, Oreide, Tombak (gehämmert: unechtes Blattgold; gepulvert: Bronzefarben, deren mannigfaltige Nuancen durch verschieden starkes Erhitzen erzielt werden) u. a. Gelbmessing (80 bis 50 Cu), dazu gehören: gewöhnliches Messing, (80 bis 60 Cu); schmiedbares Messing (Yellow Metal; bei 61,5 bis 58,3 Cu heiß schmiedbar; bei 60 bis 50 Cu bei Rotglut schmiedbar. Fehaltig (1 bis 4 %) sind Aich-, Sterro- und Deltametall (sehr hohe Zugfestigkeit; beständig gegen Meerwasser), Muntzmetall (60 Cu) u. a. Weißmessing (50 bis 10 % Cu). Rot- usw. Messing werden auch Rot- usw. Guß genannt. Alle diese Legierungen sind feste Lösungen; auch sind die Verbindungen Cu_2Zn_3 und Cu_2Zn (?) nachgewiesen. Die Dichte steigt mit dem Cu-Gehalt; die Härte hat ein Maximum bei 25,39 Cu; die Bruchfestigkeit bei 57 Cu; die Zugfestigkeit weist verschiedene Maxima auf. Hämmerbarkeit, Streckbarkeit und Feinheit des Korns nehmen mit sinkendem Cu-Gehalt ab; bei 55 Cu tritt Sprödigkeit ein. Durch Hämmern, Walzen und Ausziehen wird Messing steif und elastisch. Die Wärmeleitfähigkeit der Cu-Zn-Legierungen ist größer, ihre elektrische Leitfähigkeit kleiner als die des Cu. Das elektrochemische und das chemische Verhalten ist stark von der Zusammensetzung abhängig. Beim Erhitzen laufen die Cu-Zn-Legierungen infolge Oxydation stark unter lebhaftem Farbenwechsel an. Wasser kann aus ihnen Zn lösen. Gegen Säuren verhalten sich die Legierungen mit mehr als 50 Cu wie Cu; die übrigen lösen sich vollkommen auf. Essig- und Milchsäure holen noch in sehr starker Verdünnung (z. B. im Bier) Cu aus dem Messing. NH_3-Lösungen lösen vorzugsweise Cu, NaCl-Lösungen vorwiegend Zn.

Zum gewöhnlichen Messing zu rechnen ist das Duranametall (64,8 Cu, 29,5 Zn, 1,7 Fe, 1,7 Al, 2,3 Sn + Sb + Cd); es ersetzt das Eisen, wo dieses (z. B. für Marinezwecke) des Rostens wegen nicht verwendet werden kann. Cu-Zn-Legierungen, die bisweilen noch Sn oder Ag enthalten, dienen als „Hartlot" zum Löten von Kupfer, Messing, Bronze, Eisen.

Die Cu-Sn-Legierungen heißen Bronzen, und zwar: Schmiedbare Bronze (100 bis 94 Cu). Geschütz- und Medaillen-Bronze (94 bis 85 Cu), Glockenmetall (85 bis 75 Cu), Spiegelmetall (75 bis 60 Cu), weiche weiße Bronze 60 bis 1 Cu). Gewisse Bronzen enthalten kleine Mengen von Zn (s. auch unter Cu-Zn-Sn-Legierungen), Pb, P, Si usw. Die Phosphor- und Siliciumbronzen werden wegen ihrer großen Festigkeit u. a. zu Maschinen und Apparatenteilen bezw. zu Telephon-, Telegraphen- usw. Drähten verwendet. Die Bronzen sind meist feste Lösungen; auch sind die Verbindungen Cu_3Sn, Cu_4Sn, Cu_2Sn (?) und CuSn (?) nachgewiesen. Die Dichte der Cu-Sn-Legierungen hat ein Maximum bei 62,31 Cu, die Härte bei 68,2 Cu, die Zugfestigkeit bei etwa 80 Cu. Die Dehnbarkeit nimmt im allgemeinen mit sinkendem Cu-Gehalt ab. Cu-reiche Bronzen oxydieren sich beim Erhitzen rasch an der Luft. Bei Gegenwart von H_2O und CO_2 bedecken sie sich mit

einer aus Malachit (basischem Carbonat) und SnO_2 bestehenden Patina, unter der eine Cu_2O-Schicht liegt. Säuren wirken meist schwächer als auf die Komponenten.

Die Cu-Zn-Sn-Legierungen heißen Zinkbronze bezw. Zinnmessing, je nachdem der Gehalt an Sn größer oder kleiner ist, als der an Zn. Zinnmessing ist recht widerstandsfähig gegen chemische Angriffe; zu ihm ist das Cuivre poli zu rechnen. Die deutschen Kupfermünzen enthalten 95 Cu, 4 Sn, 1 Zn.

Die Cu-Fe-Legierungen sind keine festen Lösungen, sondern Gemische.

Die Cu-Ni-Legierungen sind feste Lösungen; sie heißen: Kupfernickel, Patentnickel, Nickelin, Rheotan, Konstantan (40 Cu) usw., viele von ihnen werden wegen ihres sehr geringen Temperatur-Koeffizienten der elektrischen Leitfähigkeit für Widerstände verwendet. Sie sind biegsam, sehr dehnbar, und fester als Cu. Die Nickelmünzen Deutschlands, Belgiens und der Vereinigten Staaten enthalten 75 Cu. Diese Legierungen sind an der Luft, auch beim Erhitzen, ferner gegen Salzlösungen (Seewasser) beständig; die Legierungen mit 60 bis 70 Cu sind als Anoden in Alkalilösungen fast unangreifbar.

Die Cu-Ni-Zn-Legierungen sind feste Lösungen; sie heißen: Neusilber (meist 65—64 Cu, 18—14 Ni, 21—18 Zn; doch schwankt der Ni-Gehalt zwischen 5—20%); Nickelin (55 Cu, 24 Ni, 21 Zn); Argentan, Weißkupfer, Packfong (altchinesische Legierung), Alpaka, Alfenide (versilbert) u. a. Die physikalischen Eigenschaften variieren stark mit der Zusammensetzung. An der Luft laufen diese Legierungen wenig an; gegen Wasser und Salzlösungen (Seewasser) sind sie, selbst in Berührung mit Eisen, ziemlich beständig. Neusilber wird auch nicht von H_2SO_4, selbst nicht als Anode, angegriffen. HNO_3 löst Cu und Zn; unter Essig bildet sich Grünspan.

Die Cu-Ni-Mn-Legierungen heißen Manganin (84 bis 86 Cu, 12 Mn, 2 bis 4 Ni); sie haben einen sehr geringen Temperaturkoeffizienten der elektrischen Leitfähigkeit und sind ein vortreffliches Material für Widerstände. Die Cu-Al-Legierungen heißen Aluminiumbronze (5 bis 10 Al); sie besitzen große Härte, Festigkeit und Zähigkeit. Ihr Farbenton kommt dem des Goldes außerordentlich nahe.

Ueber Ag-Cu und Au-Cu-Legierungen siehe die Artikel „Silber" (S. 421ff.) und „Gold" (S. 431ff.). Hier sei nur angeführt, daß der Cu-Gehalt in den Silber- oder Goldmünzen 10% beträgt.

7. Elektrochemie. Kupfer bildet zwei Reihen von Verbindungen, in denen das Kupfer zweiwertig bezw. einwertig auftritt. Die ersteren werden als Cupri-, die letzteren als Cuproverbindungen bezeichnet. Die entsprechenden Ionen sind das $Cu^{\cdot\cdot}$-(Cupri-) und das $Cu^{\cdot}$-(Cupro-) Ion. Beide Arten von Cu-Ionen haben relativ geringe „Elektroaffinität" (s. den Artikel „Chemische Theorien") und neigen daher zur Bildung von Komplexen und in Wasser schwer löslichen Verbindungen. Bei den komplexen Cuproverbindungen muß man die Betätigung von Nebenvalenzen (s. den Artikel „Valenzlehre") annehmen, z. B.

Cu—Br

Br—Cu

Das Cupriion. Das Cupriion (oder sein Hydrat) absorbiert im Rot; seine Lösungen zeigen die bekannte blaue Farbe. Cuprikupfer in Komplexen absorbiert stark selektiv; da das Cuproion wahrscheinlich farblos ist, wird man in allen farbigen Lösungen von Cu-Verbindungen Cuprikupfer in irgendwelcher Form annehmen dürfen, während in farblosen Lösungen Cuprokupfer enthalten sein wird.

Elektrochemie der Cuprisalze. $Cu(NO_3)_2$ und $CuCl_2$ sind in mäßig verdünnten wässerigen Lösungen stark, $CuSO_4$ weniger kräftig dissoziiert. In den Lösungen des letztgenannten Salzes tritt, wie Bestimmungen der Leitfähigkeit, der Ueberführungszahlen, des osmotischen Druckes usw. bei verschiedenen Verdünnungen zeigen, erhebliche „Selbstkomplexbildung" (s. den Artikel „Dissoziation. Elektrolytische Dissoziation") ein, wobei die Ionen $(Cu_2SO_4)^{\cdot\cdot}$, $(Cu(SO_4)_2)''$, $(Cu_3(SO_4)_2)^{\cdot\cdot}$ usw. zu entstehen scheinen. Mit Selbstkomplexbildung hängt die Farbenänderung der Cuprihalogenverbindungen bei Verdünnen oder beim Zusatz von fremden Chloriden zusammen. Beim $CuCl_2$ haben wir das Gleichgewicht

$$CuCl_2 + xCl' \rightleftarrows (CuCl_{2-x})^{x(')}$$

blau (grün bis) gelb

Verdünnung und Zusatz von Chloriden mit schwach elektroaffinen Kationen ($HgCl_2$, $CdCl_2$) begünstigen die linke Konzentration und Zusatz von Chloriden mit stark elektroaffinem Kation ($CaCl_2$, HCl usw.) die rechte Seite. In konzentrierten Lösungen wandert bei der Elektrolyse Cu nach der Anode; das beweist direkt das Vorhandensein komplexer Cu-Anionen (s. den Artikel „Elektrochemie"); in verdünnteren Lösungen wird die Ueberführungszahl (s. den Artikel „Elektrische Leitfähigkeit") des Cu positiv und größer als 1, was darauf hindeutet, daß auch komplexe Cu-Kationen gebildet werden (etwa $(CuCl)^{\cdot}$).

Neben der Komplexbildung kommt wahrscheinlich auch eine Hydratbildung zustande; in gewissen nicht wässerigen Lösungen bilden sich Solvate (z. B. in Pyridin, Alkohol, Aceton).

$CuBr_2$ zeigt die eben geschilderten Erscheinungen wegen der schwächeren Elektroaffinität des Br′ in noch höherem Grade; die wässerigen Lösungen zeigen bei den entsprechenden Veränderungen (s. unter $CuCl_2$) die Farbenübergänge Blau → Grün → Rotbraun.

Wegen der sehr geringen Elektroaffinität des J′ tritt schon bei ganz kleinen Cu··-Konzentrationen Jodabscheidung infolge Ionenentladung nach der Gleichung

$$Cu^{\cdot\cdot} + 2J' \rightarrow CuJ\,(\text{fest}) + J$$

ein.

Genaue Potentialmessungen haben ergeben, daß die Komplexbildung nach folgender Reihe abnimmt: Sulfat, Acetat, Nitrat; organische Cu-Salze sind wenig dissoziiert, was auf das Vorhandensein von Komplexen (bisweilen, z. B. beim Malonat, auch auf Doppelmolekeln mit den Bindungen -O-Cu-O-) hinweist.

Bei unendlicher Verdünnung ist die relative Wanderungsgeschwindigkeit (s. den Artikel „Elektrische Leitfähigkeit") $l_{(Cu^{\cdot\cdot})18^0} = 49$; die absolute Wanderungsgeschwindigkeit $U_{(Cu^{\cdot\cdot})18^0} = 0{,}000508$ cm/sec bei einem Potentialgefälle von 1 Volt/cm. Durch ein Coulomb werden bei der Elektrolyse aus Cu··-Lösungen ausgeschieden 0,0006585 g Cu.

Setzt man ε (Volt) für $Hg/HgCl/KCl_{1n}$ = + 0,56 Volt, so ist bei 18° ε (abs) für $Cu/Cu^{\cdot\cdot}{}_{1n} = + 0{,}606$ Volt, auf ein Wasserstoffnormalelektrode bezogen wird der Wert $\varepsilon_{(h)} = + 0{,}329$ Volt (s. den Artikel „Eelektrochemisches Potential"). Aus der Nernstschen Formel

$$\varepsilon = \frac{0{,}0002\,T}{n} \log^{10} \frac{P}{p}$$

(T = absolute Temperatur, n = Elektrovalenz des Kations P = Lösungsdruck des Metalls, p = osmotischer Druck der Kationen) ergibt sich P_{18^0} = etwa $3 \cdot 10^{-20}$ (s. dazu den Artikel „Potential. Elektrochemisches Potential"). Wegen dieses sehr kleinen Wertes von P, der sehr geringe Elektroaffinität des Cu bedeutet, spielt sich zwischen Cu und Cu··-Lösungen schon bei außerordentlich kleinen Cu··-Konzentrationen der Vorgang Cu·· → Cu ab. Der angeführte ε-Wert stellt das Cu in der elektrochemischen Spannungsreihe zwischen H und Bi; Cu kann demnach im allgemeinen nicht H aus H·-Lösungen entwickeln, was in chemischer und wirtschaftlicher Hinsicht von großer Bedeutung ist. Wird aber p sehr stark verringert, so kann das Cu eine wesentlich andere Stellung in der Spannungsreihe einnehmen; es löst sich z. B. in heißer KCN-Lösung unter H-Entwickelung auf, trotz der äußerst geringen H·-Konzentration, weil die Cu··-Ionenkonzentration infolge weitgehender Bildung komplexer Cuprocyanionen ganz außerordentlich klein ist. Bringt man KCN in genügender Menge ins Daniell-Element, so kann Polwechsel eintreten. In heißen konzentrierten Halogenwasserstoffsäuren löst sich Cu ebenfalls auf, da wegen starker Cu(Hal)″-Komplexbildung die Cu··-Konzentration eine sehr kleine bleibt.

Die Spannungsreihe läßt erkennen, unter welchen Umständen das Cu von anderen Metallen durch Elektrolyse getrennt werden kann; beispielsweise ist es in stark sauren Lösungen von Zn ohne weiteres zu trennen, da nach Abscheidung der am wenigsten elektroaffinen Cu··-Ionen die im Vergleich zu den Zn··-Jonen „edleren" H·-Ionen abgeschieden werden.

In der Helmholtzschen Gleichung

$$2F\varepsilon = q + 2FT\frac{d\varepsilon}{dT}$$

(F = 96540 Coulomb; siehe dazu den Artikel „Galvanische Ketten"), ist für die Abscheidung von 1 g-Atom Cu an einer Cu-Kathode in 1 n $CuSO_4$-Lösung

der Gewinn an elektrischer Energie
$2F\varepsilon = + 26800$ g-cal.

der Peltier-Effekt $FT\frac{d\varepsilon}{dT} = + 10200$ g-cal.

also beträgt die Ionisierungswärme
$q = - 16600$ g-cal.

Angewandte Elektrochemie des Cu.

1. Daniell-Element.

Anordnung: $Zn/ZnSO_4$ (1 Mol in m Liter $H_2O)/CuSO_4$ (1 Mol in n Liter H_2O/Cu. Die elektromotorische Kraft dieser Kombination kann durch die Gleichung

$$\varepsilon = 1{,}1139 - 0{,}0177 \log\frac{m}{n}$$

ausgedrückt werden.

2. Cupron-Element (Lalande); Anordnung:

$$Zn/NaOH\text{-Lösung}/Cu_2O(\text{fest})/Cu.$$

Die elektromotorische Kraft beträgt etwa 0,82 Volt; Cu_2O wirkt als Depolarisator (s. den Artikel „Galvanische Ketten") für den H_2, wobei es zu Cu reduziert wird; an der Luft regeneriert sich in der Wärme das Cu_2O.

3. Kupferzinkpaar. Mit Cu bedeckte Zinkfolie wirkt durch galvanische H_2-Entwicklung reduzierend, wobei das Cu bisweilen als positiver Katalysator fungieren soll; einige Beispiele von Reduktionswirkungen des Cu-Zn-Paares sind:

$$KClO_3 \rightarrow KCl;\ KNO_3 \rightarrow KNO_2 \text{ und } NH_3;\ H_2SO_3 \rightarrow S;\ As_2O_3 \rightarrow AsH_3.$$

4. Kupfercoulometer (— Voltameter). Durch Elektrolyse von $CuSO_4$-Lösung zwischen Cu-Elektroden und Wägen der kathodisch

abgeschiedenen Cu-Menge läßt sich die in einem bestimmten Zeitintervall durch den Querschnitt des Stromkreises gegangene Elektrizitätsmenge bestimmen.

Das Cuproion. Das Cuproion ist wahrscheinlich farblos.

Elektrochemie der Cuprosalze. Die Cuprosalze sind wegen Oxydierbarkeit, Hydrolyse und starker Komplexbildung schwierig zu untersuchen. Ob das Cuproion $Cu^{\cdot}$ oder $Cu^{\cdot}\text{-}Cu^{\cdot} = Cu_2^{\cdot\cdot}$ zu schreiben ist, läßt sich außerordentlich schwer entscheiden; auf Grund der sehr ausführlichen Untersuchungen von G. Bodländer und O. Storbeck über die Gleichgewichte von

$$Cu + Cu^{\cdot\cdot} \rightleftarrows 2\,Cu^{\cdot}$$

bezw. $$Cu + Cu^{\cdot\cdot} \rightleftarrows Cu_2^{\cdot\cdot}$$

an den Systemen

$$Cu + CuCl + CuCl_2$$

und $$Cu + CuBr + CuBr_2$$

(s. dazu die Artikel „Chemisches Gleichgewicht" und „Elektrochemie"), darf man mit großer Wahrscheinlichkeit $Cu^{\cdot}$ als die zutreffende Formulierung ansehen. — Die Cuprosalze haben starke Neigung zur Komplexbildung gemäß der Gleichung

$$m\,CuCl + n\,Cl' \rightleftarrows ((CuCl)_m Cl_n)^{n(')}$$

In Lösungen von Chloriden bilden sich Komplexverbindungen; z. B.

$$m\,CuCl + n\,KCl \rightleftarrows K_n(Cu_m Cl_{m+n}).$$

Löslichkeits- und Potentialbestimmungen (vgl. dazu den Artikel „Silber [Elektrochemie]") zeigen, daß bei niederen Cl'-Konzentrationen m = n = 1 ist, und das komplexe Anion die Zusammensetzung $(CuCl_2)'$ hat, daß aber bei höheren Cl'-Konzentrationen m = 1, n = 2 ist, und das komplexe Anion der Formel $(CuCl_3)''$ entspricht.

In $Cu^{\cdot\cdot}$-Lösungen, die metallisches Cu enthalten, stellt sich das Gleichgewicht

$$Cu^{\cdot\cdot} + Cu \rightleftarrows 2Cu^{\cdot}$$

her; die Konstante $\frac{Cu^{\cdot\cdot}}{(Cu^{\cdot})^2}$ ist von G. Bodländer und O. Storbeck bei 15° zu $1{,}45 . 10^4$ ermittelt worden. Metallisches Cu löst sich demnach in $Cu^{\cdot\cdot}$-Lösungen so lange auf, bis die Konzentration für $Cu^{\cdot}$ den Wert $\frac{1}{120}\sqrt{Cu^{\cdot\cdot}}$ erreicht hat. Mit steigender Temperatur verschiebt sich das Gleichgewicht stark nach rechts; wird konzentrierte $CuSO_4$-Lösung mit metallischem Cu bei höherer Temperatur ins Gleichgewicht gebracht, so scheiden sich beim Erkalten Cu-Kriställchen ab. Für die Darstellung von Cuprosalzen ist also hohe Temperatur günstig; es lassen sich nur die schwerlöslichen Verbindungen (Chlorid, Bromid, Jodid, Rhodanid u. a.) darstellen.

Unter gewöhnlichen Bedingungen verläuft die Reaktion $Cu^{\cdot\cdot} \rightarrow Cu^{\cdot} + (+)$ unter Abnahme der freien Energie, deren Betrag die „Triebkraft" dieser Reaktion (ausgedrückt in Voltcoulombs pro Faraday [96540 Coul.]) darstellt. Diese „Triebkraft" ist nicht groß genug, um stark elektroaffine Anionen, wie SO_4'', NO_3', F', Cl', Br' bis zur Erreichung des Sättigungszustandes in bezug auf die neutralen Anionenstoffe zu entladen; daher sind die Cuprisalze mit diesen Anionen stabil. Dagegen können $Cu^{\cdot\cdot}$-Ionen bei Gegenwart von wenig elektroaffinen bezw. leicht oxydablen Anionen wie J', CN', SO_3'', S_2O_3'' nicht in größerer Konzentration bestehen, vielmehr gehen sie unter Entladung bezw. Oxydation dieser Anionen in $Cu^{\cdot}$-Ionen über, wobei der Sättigungszustand für die Reaktionsprodukte leicht erreicht wird; beispielsweise werden in Lösungen von $Cu^{\cdot\cdot}$ und J' CuJ und J_2 abgeschieden; CuJ_2 kann daher aus wässerigen Lösungen gar nicht erhalten werden Ueber die Stabilität der $Cu^{\cdot\cdot}$-Salze läßt sich zusammenfassend Folgendes sagen: Im Vorgang

$$nCu^{\cdot\cdot} + nA' \rightleftarrows nCu^{\cdot} + nA$$

begünstigen die Bildung der rechtsstehenden Stoffe 1. Schwerlöslichkeit des betreffenden Cuprosalzes; 2. starke Neigung zur Bildung komplexer Cuproanionen; 3. geringe Elektroaffinität des Anions; 4. Schwerlöslichkeit oder leichte chemische Veränderung (z. B. Oxydierbarkeit) des Anionenstoffes.

Das Potential $Cu/Cu^{\cdot}$-Ionen ist zu berechnen, da beim Gleichgewichtszustand zwischen $Cu^{\cdot\cdot} + Cu$ und $Cu^{\cdot}$ die Spannung des Cu gegen die $Cu^{\cdot}$-Ionen den gleichen Wert hat, den sie gegen die $Cu^{\cdot\cdot}$-Ionen aufweist. Schreiben wir die Nernstsche Formel für diesen Fall in folgender Weise:

$$\varepsilon_{Cu/Cu\text{-Salzlösung}} = \frac{RT}{2F}\log P - \frac{RT}{2F}\log p$$

so ist nach dem Gesagten, wenn wir das „Elektrolytische Potential" (Wilsmore) (s. den Artikel „Potential") $\frac{RT}{nF}\log P$ allgemein mit EP bezeichnen,

$$EP_{Cu/Cu^{\cdot\cdot}} - \frac{RT}{2F}\log p_{Cu^{\cdot\cdot}} = EP_{Cu/Cu^{\cdot}} - \frac{RT}{F}\log p_{Cu^{\cdot}}$$

also

$$EP_{Cu/Cu^{\cdot}} = EP_{Cu/Cu^{\cdot\cdot}} + \frac{RT}{2F}\log\frac{(p_{Cu^{\cdot}})^2}{p_{Cu^{\cdot\cdot}}}$$

Daraus berechnet sich auf Grund des oben angegebenen Wertes für die Gleichgewichtskonstante $\frac{Cu^{\cdot\cdot}}{(Cu^{\cdot})^2}$ usw. das Potential $Cu/Cu^{\cdot}{}_{1n}$ zu + 0,731 V. Das $Cu^{\cdot}$-Ion ist also viel „edler", als das $Cu^{\cdot\cdot}$-Ion, d. h.

seine Elektroaffinität ist erheblich kleiner, seine Entladungstendenz wesentlich größer als die des $Cu^{\cdot\cdot}$-Ions; die Folge dieser Tatsache ist die Neigung der Cuprosalze zur Komplexbildung und ihre Schwerlöslichkeit in Wasser. Der elektrolytische Lösungsdruck für „Cuprokupfer" berechnet sich zu zirka 5.10^{-12} Atmosphären; der für „Cuprikupfer" beträgt (siehe oben) 3.10^{-20} Atmosphären (es ist zu beachten, daß Cuprokupfer einwertiges, Cuprikupfer ein zweiwertiges Metall darstellt).

Der Vorgang $Cu^{\cdot\cdot} \rightarrow Cu + 2 ⊕$ kann direkt sowie auch in den zwei Stufen $Cu^{\cdot\cdot} \rightarrow Cu^{\cdot} + ⊕$ und $Cu^{\cdot} \rightarrow Cu + ⊕$ isotherm und reversibel verlaufen; es muß also

$$2F\varepsilon_{Cu^{\cdot\cdot},Cu} = F\varepsilon_{Cu^{\cdot\cdot},Cu^{\cdot}} + F\varepsilon_{Cu^{\cdot},Cu}$$

oder

$$\varepsilon_{Cu^{\cdot\cdot},Cu} = \frac{1}{2}\left(\varepsilon_{Cu^{\cdot\cdot},Cu^{\cdot}} + \varepsilon_{Cu^{\cdot},Cu}\right)$$

sein (Luthersches Gesetz). Daraus läßt sich das Potential $Cu^{\cdot\cdot}/Cu^{\cdot}$ berechnen und wir bekommen folgende Tabelle:

Vorgang	Potential (Volt)
$Cu^{\cdot\cdot} \rightarrow Cu^{\cdot} + ⊕$	0,481
$Cu^{\cdot\cdot} \rightarrow Cu + 2 ⊕$	0,606
$Cu^{\cdot} \rightarrow Cu + ⊕$	0,731

Wie die Potentiale $Cu^{\cdot}/Cu$ und $Cu^{\cdot\cdot}/Cu^{\cdot}$ zeigen, können $Cu^{\cdot}$-Lösungen energisch oxydierend wie auch kräftig reduzierend wirken; während sie einerseits $Fe^{\cdot\cdot}$ zu $Fe^{\cdot\cdot\cdot}$ zu oxydieren vermögen, werden sie vom Sauer-Sauerstoff der Luft oxydiert.

Bei anodischer Auflösung werden vornehmlich $Cu^{\cdot\cdot}$-Ionen geliefert; wird aber die Konzentration des $Cu^{\cdot}$-Ions andauernd auf einem sehr niedrigen Wert gehalten, so löst sich das Cu als einwertiges Metall auf, z. B. in Thiosulfat, HCl, KCN, KBr, KJ. In konzentrierten NaCl- und KCNS-Lösungen bilden sich vorwiegend $Cu^{\cdot}$-Ionen; je verdünnter aber die Lösungen werden, um so mehr steigt der Betrag an $Cu^{\cdot\cdot}$-Ionen.

Das Ausscheidungspotential von Metallen ist wegen Diffusionsvorgängen usw. gewöhnlich von der Stromdichte abhängig; für Kupfer fanden F. Förster und G. Coffetti in n-$CuSO_4$-Lösung

Stromdichte (Amp./cm_2) 10^4	0,45	9,1	45,5	91
Kathodenpotential abs. (Volt)	+0,578	+0,551	+0,532	+0,516

Für Kupfer in KCN-Lösung fand F. Spitzer bei der Konzentration 0,1 n- (CuCN + 2KCN):

Stromdichte (Amp./cm^2/10^4	10,0	50	100;
Kathodenpot. abs. (Volt)	—1,05	—1,4	—1,49.

Die elektrochemische Spannungsreihe läßt erkennen, unter welchen Bedingungen Cu von anderen Metallen auf elektrolytischem Wege abgeschieden werden kann (H. Kiliani, M. Le Blanc und C. Freudenberg u. a.). Es werden durch Abscheidung getrennt:

Ag (aus salpetersauren Lösungen von $Cu^{\cdot\cdot} + Ag^{\cdot}$) von Cu mit 1,3—1,4 V.
Hg (aus salpetersauren Lösungen von $Cu^{\cdot\cdot} + Hg^{\cdot}$) von Cu mit 1,3 V.
Cu (aus schwefelsauren Lösungen von $Cu^{\cdot\cdot} + Cd^{\cdot\cdot}$) von Cd mit 2 V. usw.

(s. die Artikel „Elektrochemie" und „Elektroanalyse").

Komplexverbindungen, komplexe Kationen. Das Cupriion hat große Neigung, mit Ammoniak, Ammoniakderivaten u. a. komplexe Kationen von der Form $(Cu\,nA)^{\cdot\cdot}$ (A = neutrale Ammoniak- usw. Molekel) zu bilden. Die Farbe der komplexen „Cupriammoniakate" ist indigoblau bis blauviolett. In der tiefblauen Lösung von Cuprihydroxyd in NH_4OH existiert das komplexe Kation $(Cu2NH_3)^{\cdot\cdot}$ der Base $(Cu2NH_3)(OH)_2$. In den Lösungen aus $CuSO_4 + NH_4OH$ existiert das Komplexion $(Cu4NH_3)^{\cdot\cdot}$ des dunkelblauen Komplexsalzes $(Cu4NH_3)SO_4$ (Cuprammonsulfat). Mit Aminosäuren bilden sich „innere Komplexsalze" (H. Ley), z. B. mit Glykokoll das sogenannte Glykokollkupfer

$$\begin{array}{c} H_2N.CH_2.COO \\ Cu \\ H_2N.CH_2.COO \end{array}$$

(s. dazu das Kapitel „Valenzlehre").

Auch das Cuproion bildet komplexe Kationen; die farblosen Lösungen von Cuprooxyd in NH_4OH enthalten das Komplexion $(Cu\,nNH_3)^{\cdot}$ und die Base $(Cu\,nNH_3)OH$; CuCl bildet Ammoniakate von der Form $(Cu\,nA)OH$ (A = neutrale Ammoniak- usw. Molekel).

Es existieren außer den sehr zahlreichen Ammoniakaten auch viele (in wässerigen Lösungen meist noch wenig erforschte) komplexe Cupri- oder Cuproverbindungen, die an Stelle des Ammoniaks oder Ammoniakderivates dem Ammoniak fernstehende Verbindungen (z. B. Pyridin, Thiocarbamid u. a.) oder gänzlich fremde Molekeln (z. B. Kohlenoxyd) enthalten. (S. Donnans Zusammenstellung in Abeggs Handbuch.)

Komplexe Anionen. Das Cupriion bildet (wie schon oben erwähnt) mit Halogen zahlreiche komplexe Anionen. Aus HCl-Lösungen des $CuCl_2$ sind die Säuren

$H(CuCl_3)_3H_2O$, $H_2(CuCl_4)5H_2O$, $H_2(CuCl_4)$, $H_3(CuCl_5)$ mit den Komplexionen $(CuCl_3)'$ $(CuCl_4)''$ usw. isoliert worden; auch sind zahlreiche Salze ähnlicher Konstitution bekannt, z. B. $NH_4(CuCl_3)$ rot, $NH_4(CuCl_3)$ $2H_2O$ blau, $Li(CuCl_3)2H_2O$ rot. Die Farbenverschiedenheit der beiden letztgenannten analog zusammengesetzten Verbindungen wird auf verschiedene Konfiguration des H_2O zurückzuführen sein. Mit NO bilden sich komplexe chlorhaltige Anionen von schwarzgrüner Farbe. — $CuBr_2$ liefert mit HrB purpurfarbene Verbindungen mit den Komplexionen $(CuBr_3)'$ und $(CuBr_4)''$. In konzentrierten Lösungen von $CuSO_4$ und K_2 (oder Na_2, $(NH_4)_2$)SO_4 sind Komplexionen von der Form $(Cu(SO_4)_2)''$ vorhanden, nicht in den Lösungen mit $ZnSO_4$.

Von komplexen Cuprianionen sind ferner bekannt: Nitrite, Arsenite, Phosphite, Pyrophosphate, Sulfide (bei der Lösung von CuS in $(NH_4)_2S_n$ entstehen wahrscheinlich vornehmlich Cuprosulfide), Karbonate (Ostsche Lösung) usw. Sehr zahlreich sind die organischen Komplexionen, vornehmlich sind es die OH-haltigen Verbindungen der aliphatischen Reihe, die derartige Komplexionen bilden, z. B. Glycerin, Zucker, Weinsäure u. a. Am bekanntesten ist die Fehlingsche Lösung, die aus $CuSO_4$, Seignettesalz (Kaliumnatriumtartrat) und KOH hergestellt wird. Da die $Cu^{\cdot\cdot}$-Konzentration in derartigen Lösungen außerordentlich klein ist, bleiben in ihnen zahlreiche charakteristische Fällungsreaktionen für Kupfer aus. Der einfachste Tartratkomplex ist folgendermaßen zu formulieren:

```
      O - Cu—O
      |      |
KOOC—CH——————CH—COOK,
```

außerdem gibt es noch kompliziertere Komplexe. Von anderen organischen Komplexanionen seien noch die Imidkomplexe von der Form $Cu(NR)_4''$ erwähnt (NR = Säureimidrest).

Komplexe Cuproanionen sind in sehr großer Anzahl bekannt. Es wurde oben schon auseinandergesetzt, daß $Cu^{\cdot\cdot}$-Ionen bei Gegenwart von wenig elektroaffinen bezw. leicht oxydabeln Anionen nicht beständig sind, sondern in $Cu^{\cdot}$-Ionen übergehen; diese bilden dabei wegen ihrer geringen Elektroaffinität komplexe Anionen.

Von Verbindungen mit Halogenanionkomplexen sind dargestellt z. B. $H(CuCl_2)$, $K_2(CuCl_3)$, $NH_4(CuJ_2)$ usw. Alle diese Verbindungen sind farblos. In Ammoniumthiosulfat lösen sich die Cuprohalogenide unter Bildung farbloser Stoffe vom Typus $NH_4(CuX_2).4(NH_4)_2S_2O_3$ auf. Interessant sind die „Doppelkomplexsalze", die ein komplexes Kupferkation und ein komplexes Kupferanion besitzen, z. B. $(Cu4NH_3)^{\cdot\cdot}$ $(CuCl_2)_2'2H_2O$.

Lösungen von CuCl in HCl oder NH_3 absorbieren CO unter Bildung komplexer Kationen. Isoliert worden ist die Carbonylkomplexverbindung $2CuCl.CO.2H_2O$. Aus $Cu^{\cdot\cdot}$-Lösungen scheidet KCN zunächst die braungelbe Verbindung $Cu(CN)_2$ ab, die bald in das grüne Cyanidkomplexsalz $Cu^{\cdot\cdot}(Cu(CN)_2)_2'5H_2O$ übergeht; in der Wärme entsteht das weiße CuCN, das im Ueberschuß des Fällungsmittels unter Bildung von $Cu(CN)_3''$- und $Cu(CN)_4'''$-Ionen in Lösung geht. Bekannt sind Salze von den Typen $MeCu(CN)_2$, $M_2Cu(CN)_3$, $Me_3Cu(CN)_4$, $MeCu_2(CN)_3$ usw.; alle sind farblos. Wegen der starken Komplexität von $KCu(CN)_2$ lösen sich alle festen Cu-Verbindungen (auch CuS) in KCN-Lösungen auf.

Rhodanidkomplexe von den Typen $MeCu(CNS)_2$ und $Me_5Cu_2(CNS)_7$ sind bekannt; sie sind farblos. In $CuSO_4$-Lösungen bildet sich bei Gegenwart von metallischem Kupfer das Sulfatkomplexion $(CuSO_4)'$, und zwar endotherm; aus heißen Cu-haltigen $CuSO_4$-Lösungen scheidet sich dementsprechend beim Abkühlen metallisches Kupfer aus.

Beim Einleiten von SO_2 in eine mit metallischem Cu versetzte $CuSO_4$-Lösung entsteht das rote Sulfidkomplexsalz $Cu^{\cdot\cdot}(CuSO_3)_2'2H_2O$. Aus Alkalisulfiten und Cuprisalzen bilden sich Komplexverbindungen von der Form $Me^{\cdot}(CuSO_3)'$.

Von Thiosulfatkomplexen ist bekannt z. B. das beständige Salz $K_4Cu_2(S_2O_3)_3$. $2H_2O$.

Eine Schmelze von $Cu_2S + Na_2S$ liefert die Sulfidkomplexverbindung Na(CuS) (stahlblaue Nadeln); auch Verbindungen mit den Anionen $(CuS_4)'$, $(CuS_2)'''$ und $(Cu_2S_3)''''$ sind bekannt; darunter komplizierte Stoffe wie $K^{\cdot}{}_2Cu^{\cdot\cdot}Fe^{\cdot\cdot}(CuS_2)'''_2$.

Hydrolyse. Die $Cu^{\cdot\cdot}$-Salze — auch die starker Säuren — sind erheblich hydrolysiert; dadurch wird die schwach basische Natur des CuO bewiesen, die sich auch aus der Existenz zahlreicher basischer Verbindungen ergibt. $Cu(OH)_2$ ist eine schwächere Base als die Hydroxyde vom Mg, Cd, Zn, $Mn_{(II)}$, $Fe_{(II)}$, $Ni_{(II)}$, $Co_{(II)}$ und $Pb_{(II)}$, eine stärkere als die des Be und $Hg_{(II)}$. Cu(OH) ist noch weniger basisch, CuCl daher sehr stark hydrolysiert.

Basische Salze. Die basischen $Cu^{\cdot\cdot}$-Verbindungen sind meist grünlich gefärbt; viele von ihnen kommen in der Natur vor z. B. $CuCl_2.3CuO.4H_2O$ Atakamit; $CuCO_3$. $Cu(OH)_2$ Malachit; $Cu(C_2H_3O_2).Cu(OH)_2$. $5H_2O$ Blauer Grünspan; $Cu(C_2H_3O_2)_2.2Cu$ $(OH)_2$ Grüner Grünspan. Bei Einwirkung von braunem $Cu(OH)_2$ auf verdünnte $Cu^{\cdot\cdot}$-Salzlösungen entstehen kristallinische ba-

sische Salze, z. B. $CuCl_2.3Cu(OH)_2$; $Cu(NO_3)_2.3Cu(OH)_2$; $CuSO_4.3Cu(OH)_2.H_2O$; $2CuSO_4.3Cu(OH)_2.2H_2O$ usw.

$Cu(OH)_2$ bildet auch mit anderen Schwermetallsalzen basische Verbindungen, z. B. $AgNO_3.Cu(OH)_2$.

Organische Cu-Salze (z. B. das des Acetessigesters) erleiden in alkoholischen Lösungen „Alkoholyse" unter Bildung von Alkoholaten (s. den Artikel „Alkohole").

8. Analytische Chemie. Qualitativer Nachweis. I. des $Cu^{\cdot\cdot}$-Ions; 1. mit H_2S; schwarzer Niederschlag von CuS aus HCl-Lösung; scheidet sich bei schwach saurer Lösung leicht kolloid ab; der Koagulation günstig sind reichlicher Säuregehalt und hohe Temperatur. Löslich in heißer verdünnter HNO_3, unlöslich in kochender verdünnter H_2SO_4, löslich in KCN, fast unlöslich in Na_2S, etwas löslich in $(NH_4)_2S$.

2. mit NH_4OH; blauer Niederschlag von $Cu(OH)_2$, löslich im Ueberschuß des Fällungsmittels mit tiefblauer Farbe.

3. mit $K_4Fe(CN)_6$; braunroter Niederschlag von $Cu_2Fe(CN)_6$.

4. mit HBr (konz.; KBr (fest) + wenig H_2SO_4), purpurfarbige Lösung.

5. durch trockene Analyse: mit dem Lötrohr Reduktion zu metallischem Cu; Boraxperle blaugrün.

II. des $Cu^{\cdot}$-Ions; mit KOH usw. gelbe bis rote Fällung von Cu_2O.

Quantitative Bestimmung: 1. als CuO; Fällung mit OH'-Lösungen in der Hitze; Niederschlag wird gewaschen und geglüht.

2. als Cu_2S; Fällung mit H_2S in heißer, stark saurer Lösung, oder mit $(NH_4)_2S_2O_3$, Niederschlag wird im Roseschen Tiegel mit S zusammen im H_2-Strom geglüht und dabei in Cu_2S übergeführt. (Der H_2S-Niederschlag ist nicht für quantitative Bestimmungen brauchbar, da er neben CuS auch Cu_2S und S enthält).

3. als CuCNS durch Fällen mit NH_4CNS aus schwach saurer Lösung bei Gegenwart von H_2SO_3.

4. elektrolytisch als metallisches Cu, abgeschieden aus Lösungen mit 8—10% HNO_3 (Abwesenheit von Cl' erforderlich) oder aus H_2SO_4-Lösung bei 75°, oder (bei Anwesenheit von Cl') aus NH_3-Lösung. Der Cu-Niederschlag wird bei Luftabschluß mit Wasser gewaschen und mit Alkohol getrocknet.

5. titrimetrisch mittels überschüssigen NH_4CNS bei Gegenwart von H_2SO_3; der Ueberschuß des Fällungsmittels wird mit $AgNO_3$ unter Verwendung eines Ferrisalzes als Indikator zurücktitriert.

Löslichkeitsverhältnisse. Die Schwerlöslichkeit nimmt für Cupriverbindungen zu nach der Reihe: Basisches Carbonat, Hydroxyd, Arsenat, Orthophosphat, Ferrocyanid, Sulfid; für die Cuproverbindungen nach der Reihe: Chlorid, Carbonat, Bromid, Oxyd, Jodid, Rhodanid, Sulfid. Die (aus Leitfähigkeits- und Potentialmessungen berechnete) Konzentration der $Cu^{\cdot}$-Ionen in Grammionen pro Liter beträgt bei 25° für CuCl $1,1.10^{-3}$, für CuBr $2,0.10^{-4}$, für CuJ $2,25\,10^{-6}$.

9. Spezielle Chemie. Wirkung von Säuren, Basen, Salzen, Gasen usw. auf Cu. $H^{\cdot}$-Ionen können durch Cu unter normalen Verhältnissen der Ionenkonzentrationen, wie die elektrolytischen Potentiale zeigen, nur zu H_2 von äußerst kleiner Konzentration entladen werden. Wird der H_2 aber wegoxydiert, so geht Cu in Lösung; bei Gegenwart von O_2 wird Cu selbst von verdünnten schwachen Säuren angegriffen (Patina-, Grünspanbildung); Nahrungsmittel dürfen deshalb nicht in offenen Cu-Gefäßen aufbewahrt werden. Auch wenn die Konzentration der Kupferionen durch Komplexbildung auf einem außerordentlich niedrigen Wert gehalten wird, kann Cu die $H^{\cdot}$-Ionen zu H_2 von Atmosphärendruck entladen (Auflösung des Cu in Halogenwasserstoffsäuren, in KCN (Bildung komplexer Cu-Anionen); in NH_4OH (Bildung komplexer Kupferkationen; siehe S. 412). Bei der Einwirkung von HNO_3, H_2CrO_4, H_2SO_4 (konz.) usw. bilden die Säuren selbst den „Depolarisator", der den H_2 wegoxydiert. Bei HNO_3 ist die entstehende HNO_2 (katalytisch) wirksam (Autokatalyse); wird dieser Stoff durch H_2O_2, $KMnO_4$ oder dgl. zerstört, so greift verdünnte HNO_2 das Cu wenig an. Bei der Auflösung des Cu in HNO_3 entstehen neben $Cu(NO_3)_2$ (teils infolge von Nebenwirkungen) N_2O_3, N_2O_4, NO, N_2O. Bei der Auflösung von Cu in H_2SO_4 (konz.) entstehen neben $CuSO_4$ noch Cu_2S und SO_2.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß die Auflösung (Angreifbarkeit) des Cu in Salz- usw. Lösungen begünstigt wird:

1. durch hohe Konzentration eines „Depolarisators" für H_2 (Sauerstoff, oxydierende Säuren usw.);

2. durch starke Verminderung der Kupferionenkonzentration a) infolge Komplexbildung (Wirkung von Halogenwasserstoffsäuren, KCN, NH_4OH usw.), b) infolge von Bildung schwerlöslicher Kupferverbindungen (basische Halogenide und Carbonate);

3. durch hohe Konzentration der $H^{\cdot}$-Ionen.

Diese Wirkungen sind für die Beurteilung des Cu als Material für Kochgeschirr Dampfkessel, Rohrleitungen, Schiffsbekleidung usw. von größter Wichtigkeit.

N_2 ist ohne Wirkung auf Cu. H_2 wird von fein verteiltem Cu absorbiert. NH_3 wirkt bei 800° auf Cu unter Bildung von Cu_3N(?) ein. O_2 bildet bei normalem Druck und niederer

Temperatur CuO; fein verteiltes, in H_2 reduziertes Cu kann auch erst Cu_2O liefern. Bei höheren Temperaturen entstehen CuO + Cu_2O, bei hohen Temperaturen, wenn die Dissoziationsspannung des O im CuO den atmosphärischen O_2-Druck übersteigt, Cu_2O; wird der O_2-Druck entsprechend hoch gehalten, so entsteht natürlich auch bei hohen Temperaturen CuO. Die an feuchter Luft auf Cu entstehende Schicht von Sauerstoffverbindungen (und Carbonaten) bleibt sehr dünn und bildet eine Schutzhülle für das darunter liegende Metall (Patina). Die bei Rotglut entstehende Oxydschicht blättert dagegen leicht ab.

Cl_2 von Atmosphärendruck liefert bei niederen Temperaturen $CuCl_2$. Bei höheren Temperaturen, bei denen der Cl_2-Druck des $CuCl_2 > 76$ cm, der des $CuCl < 76$ cm, entsteht nur CuCl. Stickoxyde wirken oxydierend; bei niederen Temperaturen wird NO_2 von feinverteiltem Cu absorbiert, wobei wahrscheinlich $Cu^{\cdot\cdot}$-und $Cu^{\cdot}$-Nitrit entstehen.

HCl(Gas) liefert bei der Einwirkung auf erhitztes Kupfer CuCl und H_2.

Oxydierende Wirkung der Cu-Salze. Fassen wir die auf S. 412 mitgeteilten Potentiale für die drei verschiedenen „Elektronenvorgänge" beim Cu als Oxydationspotentiale (s. den Artikel „Potential") auf, so sehen wir, daß die $Cu^{\cdot}$-Ionen in ionennormaler Lösung ein stärkeres Oxydationsmittel wären, als die $Cu^{\cdot\cdot}$-Ionen; da $Cu^{\cdot}$-Ionen aber nur in sehr geringen Konzentrationen auftreten können, bleibt ihre oxydierende Wirksamkeit relativ klein. Die wenig elektroaffinen Ionen J' und CN' werden durch $Cu^{\cdot\cdot}$-Ionen zu J_2 und $(CN)_2$ oxydiert. OH' kann nur entladen werden, wenn für den entstehenden O_2 ein „Depolarisator" vorhanden ist. Vgl. das Verhalten der $H^{\cdot}$-Ionen, S. 414.)

Der oxydierenden Wirkung der $Cu^{\cdot\cdot}$-Salze günstig sind:

1. hohe Konzentration der $Cu^{\cdot\cdot}$-Ionen;

2. niedrige Konzentration der $Cu^{\cdot}$-Ionen; diese läßt sich durch Zusatz von Anionen, die mit den $Cu^{\cdot}$-Ionen Komplexe oder schwerlösliche Verbindungen bilden, erreichen (Sulfite werden unter Bildung stark komplexer Cuprosulfitanionen durch $Cu^{\cdot\cdot}$-Salze oxydiert; durch kleine Mengen von KCN, $K_4Fe(CN)_6$, gewisser organischer Stoffe usw. werden $Cu^{\cdot\cdot}$-Salze „aktiviert");

3. niedrige Konzentration der $H^{\cdot}$-Ionen, hohe Konzentration der OH'-Ionen, wie die Diskussion der Reaktionsschemata

$$2Cu^{\cdot\cdot} \rightarrow 2Cu^{\cdot} + 2\,(+)$$
$$2\,(+) + 2OH' \rightarrow H_2O + O + 2\,(-)$$
$$O + \text{oxydabler Stoff} \rightarrow \text{Oxyd}$$

und die Tatsache, daß $H^{\cdot}$-Ionen die Konzentration der OH'-Ionen außerordentlich stark herabsetzen ($OH' = \frac{K}{H^{\cdot}}$; s. den Artikel „Gleichgewichtslehre"), erkennen lassen. $Cu^{\cdot\cdot}$-Salze schwacher Säuren (z. B. das Acetat) wirken daher (wegen der niedrigen $H^{\cdot}$-Ionen-Konzentration, die durch den geringen Dissoziationsgrad der hydrolytisch abgespaltenen Säure bedingt ist) unter sonst gleichen Bedingungen stärker oxydierend, als die $Cu^{\cdot\cdot}$-Salze starker Säuren (z. B. das Sulfat). An OH' reiche Lösungen, die lösliche komplexe (immerhin etwas dissoziierte) $Cu^{\cdot\cdot}$-Verbindungen enthalten, können nach obigem Schema oxydierend wirken, z. B. ammoniakalische $Cu^{\cdot\cdot}$ Oxyd- oder -Salzlösungen, Fehlingsche Lösung usw. (Anwendung dieser Lösungen zur Oxydation von Cellulose, gewisser Zuckerarten usw., die der Inversion wegen die Verwendung von sauren Oxydationsmitteln nicht zulassen).

In dem Gleichgewicht $Cu^{\cdot\cdot} + Fe^{\cdot\cdot} \rightleftarrows Cu^{\cdot} + Fe^{\cdot\cdot\cdot}$ prävaliert unter gewöhnlichen Bedingungen weitaus die linke Seite; wird aber die Konzentration der $Cu^{\cdot}$- oder der $Fe^{\cdot\cdot\cdot}$-Ionen oder beider gleichzeitig sehr niedrig gehalten, so kommt die oxydierende Wirkung der $Cu^{\cdot\cdot}$-Ionen stark zur Geltung. Das ist der Fall beim Zusatz von NH_4OH, KOH, KCNS, KJ, KF. Die oxydierende Wirksamkeit der $Cu^{\cdot}$-Salze zeigt sich in einer Lösung von CuBr + HBr + $FeSO_4$, in der sich der Vorgang $Cu^{\cdot} + Fe^{\cdot\cdot} \rightleftarrows Cu + Fe^{\cdot\cdot\cdot}$ abspielt.

Katalytische Wirkung von Cu-Salzen.

I. Oxydationsprozesse. 1. Oxydation durch O_2. Der dem Deacon-Verfahren zur Chlordarstellung (s. den Artikel „Chlor") zugrundeliegende bei hoher Temperatur (ca. 450°) verlaufende Vorgang

$$O_2 + 4HCl \rightleftarrows 2H_2O + Cl_2$$

wird durch Cuprisalze stark katalytisch beschleunigt. Für die Autoxydation von H_2SO_3 und Na_2SO_3 sind Kupfersalze äußerst starke positive Katalysatoren. Viele organische Verbindungen werden bei Gegenwart von Kupferverbindungen schnell oxydiert, z. B. Methylalkohol zu Formaldehyd, Dimethylanilin + Dimethyltoluidin zu Methylviolett usw. Beim Ueberleiten von Ammoniak + Sauerstoff über glühendes metallisches Cu entsteht neben Stickoxyden Stickstoff nach der Formel

$$4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2N_2 + 6H_2O$$

Metallisches Cu (feines Drahtnetz) wirkt bei höherer Temperatur als Katalysator für die Oxydation des Methylalkohols zu Formaldehyd, des Methans zu Methylalkohol und Formaldehyd.

2. Oxydation durch sauerstoffhaltige Verbindungen. Die Oxydation von HJ bezw. KJ durch Bromate und Persulfate wird durch $Cu^{\cdot\cdot}$-Salze katalytisch beschleunigt. Bei der

Oxydation des HJ durch H_2O_2 wirken Cu··-Salze als starke positive Katalysatoren, wenn gleichzeitig Fe··-Ionen anwesend sind. Auch bei organischen Oxydationsprozessen, z. B. bei der Oxydation des Anilins durch heiße konzentrierte Schwefelsäure, wirken Cu··-Salze katalytisch beschleunigend.

II. Reduktionsprozesse. Bei Gegenwart von fein verteiltem Cu werden Stickoxyde, Acetylen, Aldehyde, Ketone und Nitrokohlenwasserstoffe durch H_2 bei 180 bis 250° reduziert.

III. Andere Katalysen. Die Sandmeyersche Reaktion, d. h. die Ueberführung eines Diazoniumsalzes in Stickstoff und substituierten aromatischem Kohlenwasserstoff (s. den Artikel „Azo- und Diazoverbindungen") bei Anwesenheit von Cu·-Salzen (in den entsprechenden Säuren gelöst) in der Wärme und die Gattermannsche Reaktion, bei der zum gleichen Zweck Kupferpulver und die betreffende Säure in der Kälte angewandt werden, gehören wohl hierher.

Die wichtigsten Kupferverbindungen.

I. Cuproverbindungen.

CuH Cuprohydrid; entsteht durch Reduktion von $CuSO_4$ mittels unterphosphoriger Säure; braunes Pulver.

CuF Cuprofluorid; entsteht durch Dissoziation des CuF_2 bei hoher Temperatur; rubinrot.

CuCl Cuprochlorid; entsteht durch Erhitzen des $CuCl_2$ mit HCl + Cu, Ausfällen durch Eingießen in kaltes Wasser und schnelles Absaugen. In völlig trockenem Zustand licht- und luftbeständig; in feuchtem Zustand oxydiert es sich. Weiß, Tetraeder; d 3,53, Fp. 434°, Sdp. etwa 1000°. Dampfdichte fast normal. In geschmolzenem $BiCl_3$ zeigt es ein der Formel CuCl entsprechendes Molargewicht; die in geschmolzenem $HgCl_2$ erhaltenen Zahlen liegen zwischen den für CuCl und Cu_2Cl_2 sich ergebenden Werten. Mit H_2O bildet es Cu_2O, $CuCl_2$ und Cu. In HCl, Alkalichloridlösungen und NH_4OH löst es sich unter Komplexbildung; die HCl -und NH_4Cl-Lösungen absorbieren CO. Das Komplexsalz $(CuNH_3)^{\cdot}Cl'$ entsteht aus NH_4Cl und Cu.

CuBr Cuprobromid; seine Darstellung erfolgt analog der des CuCl. Weiß; d 4,72. Fp. 504°; Sdp. ca 900°. Löst sich unter Komplexbildung in HBr, HCl, NaCl, NH_4OH usw.

CuJ Cuprojodid; entsteht beim Zusatz von KJ-Lösung zu Cu··-Salzlösungen; zur Beseitigung des sich gleichzeitig abscheidenden J_2 setzt man H_2SO_3 zu. Weiß; d 5,67. Fp. 628°, Sdp. etwa 765°. Löslich unter Komplexbildung in KJ, KCN, NH_4OH usw. Durch Kochen mit KOH entstehen KJ und Cu_2O.

CuOH Cuprohydroxyd; ist wahrscheinlich noch unbekannt; die als CuOH angesprochenen Präparate sind vermutlich Cu_2O-Hydrogele.

Cu_2O Cuprooxyd (Kupferoxydul); entsteht durch Reduktion von komplexen Cu··-Verbindungen in alkalischer Lösung durch organische Substanzen von schwachem Reduktionspotential, z. B. durch gewisse Zuckerarten (Fehlingsche Lösung). Gelb (wahrscheinlich Cu_2O-Gele) oder rot (kristallinisches Cu_2O). Die roten Kristalle sind regulär; in trockenem Zustand sind sie luftbeständig. d 5,8 bis 6,2. Löslich in NH_4OH unter Bildung komplexer Kationen. Verdünnte O-haltige Säuren liefern Cu··-Salz + Cu; Halogenwasserstoffsäuren geben Cu·-Halogenide und deren Komplexe.

Cu_4O Kupfersuboxyd; entsteht aus $CuSO_4$ und alkalischer $SnCl_2$-Lösung; seine Zusammensetzung ist fraglich. Olivengrün.

Cu_2S Cuprosulfit (Kupfersulfür); entsteht aus Cu + S bei hoher Temperatur, besser aus CuS(+ S) durch Erhitzen im H_2-Strom. Schwarz, regulär. d 5,58. Fp. 1091°. Schwer löslich in heißer konzentrierter HCl, leicht in HNO_3. Bei hohen Temperaturen spielen sich die Vorgänge

$$Cu_2S \rightleftarrows 2Cu + S$$
$$Cu_2S + S \rightleftarrows 2CuS$$

ab.

Cu_2Se Cuproselenid; entsteht durch Erhitzen von Cu in Se-Dampf.

Cu_2Te Cuprotellurid; entsteht durch Erhitzen von Cu in Te-Dampf.

Cu_3N Cupronitrid; entsteht bei der Einwirkung von trockenem NH_3 auf Cu_2O oder CuO bei 250°. Dunkelolivengrün. Daß der Stickstoff nicht lediglich in Cu gelöst ist, beweist die Tatsache, daß bei der Einwirkung von Säuren kein freier Stickstoff entsteht.

Cu_3P Cuprophosphid; entsteht beim Ueberleiten von PH_3 über erhitztes CuCl. Schwarz.

Cu_2C_2 Cuprocarbid; Cuproacetylid entsteht bei der Einwirkung von C_2H_2 auf ammoniakalische CuCl-Lösung oder auf in H_2O suspendiertes Cu_2O. Braunrot; ist in trockenem Zustand explosiv.

Cu_3Si Cuprosilicid; entsteht beim Zusammenschmelzen von Cu und Si.

Cu_2SiF_6 Cuprosilicofluorid ist kupferrot.

CuCN Cuprocyanid; entsteht durch Fällung von CuCl-KCl-Lösung mit KCN bezw. durch Erwärmen von Cu··-Salzlösung mit KCN. Weiß; löslich in NH_4OH, Ammonsalzlösungen, KCN usw. unter Komplexbildung.

CuCNS Cuprorhodanid (-sulfocyanid); entsteht aus Cu··-Salzlösungen mittels KCNS bei Gegenwart von H_2SO_3. Weiß, löslich in NH_4OH.

II. Cupriverbindungen.

CuH_2 Cuprihydrid; entsteht vielleicht bei der Zersetzung des CuH und bei der Redution von CuO durch H_2.

$CuF_2.2H_2O$ Cuprifluorid; bildet sich beim Auflösen von CuO in HF. Hellblau, wenig löslich. Durch Erhitzen entsteht CuF_2; weiß.

$CuCl_2.2H_2O$ Cuprochlorid; entsteht beim Auflösen von CuO in HCl. Gewöhnlich infolge anhaftender Mutterlauge) grün; in ganz reinem Zustand blau. d 2,5. Löslichkeitsversuche zeigen, daß das Hydrat mit $2H_2O$ zwischen —20° und + 91° stabil ist. $CuCl_2.2H_2O$ gibt beim Erhitzen HCl ab. Von basischen Salzen sind besonders genau bekannt $CuCl_2.3CuO.4H_2O$ (Atakamit), $CuCl_2.3CuO.3H_2O$ und $CuCl_2.3CuO.2H_2O$. — $CuCl_2$ entsteht durch Erhitzen des Hydrates auf 150° im HCl-Strom. Braungelb; d 3,05; Fp. 498°; hygroskopisch; leicht löslich in Wasser und vielen organischen Flüssigkeiten, mit denen es vielfach elektrolytisch leitende Lösungen gibt. In Aethylalkohol zeigt $CuCl_2$ ziemlich normales Molargewicht; in Aceton ist es beträchtlich assoziiert (zeigt aber dabei merkliche Leitfähigkeit); in geschmolzenem Acetamid ist es stark ionisiert; in siedendem $BiCl_3$ zeigt es normales Molargewicht. CuCl im O_2-Strom erhitzt gibt unter Bildung eines basischen Salzes Cl_2 ab. $CuCl_2.LiCl.2H_2O$ (granatrot), $CuCl_2.2KCl.2H_2O$ (blaugrüne Tafeln), $CuCl_2.KCl$ (feine braune Nadeln) und ähnliche „Doppelsalze" sind wahrscheinlich komplex. Komplexverbindungen vom Typus $(Cu\,nNH_3)Cl_2$ (n = 2, 4, 6) sind bekannt.

$CuBr_2$ Cupribromid; entsteht durch Auflösen von CuO in HBr und Verdunsten der Lösung bei niederer Temperatur. Schwarz, zerfließlich. Wässerige Lösungen des $CuBr_2$ sind je nach Konzentration und Temperatur blau, grün, gelb oder braun wegen verschieden starker Komplexbildung bezw. Hydratation der Molekeln und Ionen. Bei Rotglut zerfällt $CuBr_2$ in CuBr und Br. — Das Hydrat $CuBr_2$-$4H_2O$ ist grün.

$CuBr_2.2LiBr.6H_2O$ bildet dunkelrotbraune Nadeln; die purpurfarbige Lösung des Salzes entsteht bei Zusatz von LiCl zu einer dunkelbraunen Lösung von $CuBr_2$. Das Salz ist wohl als Komplexverbindung $(Li.3H_2O)_2.CuBr_4$ aufzufassen.

CuJ_2 Cuprijodid; ist in festem Zustand noch nicht erhalten worden. Bei der Einwirkung von gelöstem Jod auf festes CuJ spielt sich zwar der Vorgang

$$2CuJ\ (\text{fest}) + J_2\ (\text{gelöst}) \leftrightarrows 2Cu^{\cdot\cdot} + 4J'$$

ab, aber durch Einengen der Lösung ist aus den S. 411 besprochenen Gründen ebensowenig CuJ_2 zu erhalten, wie bei der Einwirkung von KJ auf $Cu^{\cdot\cdot}$-Salze.

$Cu(OH)_2$ Cuprihydroxyd. Der aus $Cu^{\cdot\cdot}$-Lösungen durch OH'-Ionen gefällte blaue gelatinöse Niederschlag ist ein Hydrogel variabler Zusammensetzung. Man kann aber kristallinisches $Cu(OH)_2$ herstellen, das im Gegensatz zum kolloiden gegen siedendes H_2O beständig ist. Löst sich in NH_4OH unter Komplexbildung auf; in sehr konzentriertem KOH bildet es eine kolloide Lösung. — $(Cu2NH_3)(OH)_2$ Cupriammoniakhydroxyd; entsteht durch Einwirkung von Luft auf Cu-Späne unter Ammoniak; die tiefblaue Lösung, das sogenannte Schweizersche Reagenz, löst Cellulose (unter Bildung von Oxycellulose) auf.

CuO Cuprioxyd (Kupferoxyd); entsteht durch Erhitzen von $Cu(OH)_2$, $CuCO_3$ oder $Cu(NO_3)_2$. Schwarz, amorph, auch kristallinisch darstellbar. d 6,3. Fp. 1064°. Bei hohen Temperaturen läßt sich das Gleichgewicht

$$2CuO \leftrightarrows Cu_2O + O$$

messen; der Dissoziationsdruck beträgt bei 1000° zirka 108 mm. Darauf beruht die Verwendung des CuO in der organischen Elementaranalyse als Oxydationsmittel bei Rotglut. Für Gase (CO_2, O_2, N_2 usw.) besitzt CuO große Adsorptionsfähigkeit.

$CuO_2.H_2O$ Kupferperoxyd; braun; entsteht durch Einwirkung von H_2O_2 auf $Cu(OH)_2$ in der Kälte.

Cu_2O_3 Cuprisäure (gelb?); scheint bei der Elektrolyse mit hoher Stromdichte an einer gekühlten Cu-Anode sowie bei der Einwirkung von Hypochloriten auf $Cu(OH)_2$ zu entstehen.

CuS Cuprisulfid; der H_2S-Niederschlag aus $Cu^{\cdot\cdot}$-Lösungen enthält CuS, Cu_2S und S; es läßt sich rein amorph (dunkelgrün) oder kristallinisch (violett bis schwarz) darstellen; in Na_2S_n ist es merklich löslich. Es sind mehrere Cu-polysulfide bekannt.

CuSe Cupriselenid; schwarzgrün.

CuTe Cupritellurid; noch wenig untersucht

$Cu(N_3)_2$ Cuprinitrid (stickstoffwasserstoffsaures Cu); aus Cu und HN_3 bezw. aus $CuSO_4$ und NaN_3; dunkelrotbraun; sehr explosiv.

Cu_3P_2 Cupriphosphid; entsteht aus $CuCl_2$ und PH_3 in der Hitze, schwarz. Es sind auch Phosphide anderer Zusammensetzung bekannt.

Cu_2C Cupriacetylid, Cupricarbid; aus ammoniakalischen $Cu^{\cdot\cdot}$-Lösungen mittels C_2H_2; schwarz, explosiv.

Cu_2Si Cuprisilicid; noch nicht mit Sicherheit bekannt.

$CuSiF_6.6H_2O$ Cuprisilicofluorid; aus H_2SiF_6 und $Cu(OH)_2$ usw.; blaue Kristalle, oberhalb 50° entsteht $CuSiF_6.4H_2O$.

$Cu(CN)_2$ Cupricyanid; aus $Cu^{\cdot\cdot}$-Lösungen und KCN; braungelb; in nassem Zustand sehr instabil; geht unter $(CN)_2$-Abgabe in der Kälte in $Cu^{\cdot\cdot}(Cu(CN)_2)_2'.5H_2O$, in der Wärme in CuCN über. (Verfahren zur $(CN)_2$-Darstellung.)

$Cu(CNS)_2$ Cuprirhodanid (-sulfocyanat, Rhodankupfer); sammetschwarz; aus sehr konzentrierten $Cu^{\cdot\cdot}$-Lösungen mittels KCNS bestellbar; geht leicht in weißes CuCNS über.

$Cu(ClO_3)_2.4H_2O$, $Cu(BrO_3)_2.6H_2O$, $Cu(JO_3)_2.H_2O$ sowie auch Halogenate mit anderem Kristallwassergehalt sind untersucht worden.

$CuSO_3$ Cuprisulfit; ist instabil; bei Versuchen in seiner Darstellung erhält man das rote Chevreulsche Salz $Cu^{\cdot\cdot}(CuSO_3)_2'.2H_2O$.

$CuSO_4.5H_2O$ Cuprisulfat (Kupfervitriol); entsteht aus Cu oder CuO und H_2SO_4; blau, triklin. d 2,282; spezifische Wärme 0,285; Lösungswärme + 15800 g.cal bei der Lösung von 1 Mol Salz in 400 Mol H_2O. Außer dem Pentahydrat existieren noch eine ganze Reihe anderer Cuprisulfate; folgende Reihe gibt ihre Zusammensetzung und die zugehörigen Umwandlungspunkte (U.P.), soweit sie sicher festgestellt sind: $CuSO_4.9H_2O$(U.P. —20°) $CuSO_4.6H_2O$; $CuSO_4.5H_2O$(U.P. 106°) $CuSO_4.3H_2O$; $CuSO_4.H_2O$; $CuSO_4$. — Die Hydrate sind dunkel- bis blaßblau, das Anhydrid ist weiß. — $CuSO_4.5H_2O$ ist leicht löslich in H_2O, CH_3OH, weniger in C_2H_5OH, in Glycerin (smaragdgrün), Chinolin (die Lösung zeigt elektrische Leitfähigkeit). Die Ueberführungszahl für das $Cu^{\cdot\cdot}$-Ion in wässerigen $CuSO_4$-Lösungen ist bei Zimmertemperatur von der Konzentration 0,04 n abwärts 0,375.

Ueber den Dissoziationsgrad und über die Leitfähigkeitsverhältnisse von $CuSO_4$-Lösungen geben die nachstehenden Daten Aufschluß:

n	i	n	$\varkappa.10^4$	Λ
0,0006	1,93	0,321	109	34,0
0,006	1,68	1,387	320	23,1
0,06	1,41	2,631	458	17,4
0,6	1,24	$\Lambda\infty$ = 109,9		

(n = Normalität; i = Verhältnis der tatsächlich vorhandenen Molekeln zur Zahl der ohne elektrolytische Dissoziation berechneten Molekeln [pv = iRT; der Dissoziationsgrad α ist gleich

$$\frac{i-1}{z-1},$$

worin z die Zahl der Teilmolekeln bedeutet, in die eine Molekel bei der elektrolytischen Dissoziation zerfällt, für $CuSO_4$ ist z = 2]; $\varkappa$ = spezifische Leitfähigkeit bei 18°; Λ äquivalente Leitfähigkeit bei 18°.) Bekannt sind: Basische Salze, z. B. $CuSO_4.3CuO.4H_2O$ (kommt in der Natur als Langit vor); Doppelsalze vom Typus $CuSO_4.Me_2SO_4.6H_2O$ bezw. $Me_2Cu(SO_4)_2.6H_2O$ (Me = K, Rb, Cs, NH_4). — Cuprisulfat bildet Mischkristalle mit den Sulfaten von Zn, $Fe_{(II)}$, Co Ni, $Mn_{(II)}$, Cd, Mg; die meisten kristallisieren mit 7 oder 5, einzelne mit 6 oder 3 Molekeln Kristallwasser. — $(Cu4NH_3)SO_3$ Cupriammonsulfat läßt sich aus $CuSO_4$ und NH_4OH erhalten; dunkelblau, wasserlöslich; auch die Komplexverbindungen mit 1, 2 und $5NH_3$ sind bekannt.

$Cu(NO_2)_2$ Cuprinitrit; ist unbekannt, doch scheinen Doppelverbindungen von ihm zu existieren.

$Cu(NO_3)_2.6H_2O$ Cuprinitrat; wird am besten aus CuO und HNO_3 erhalten; es existieren folgende Hydrate (U.P. = Umwandlungspunkt): $Cu(NO_3)_2.9H_2O$(U.P. —20,5°) $Cu(NO_3)_2.6H_2O$ (blaue Tafeln; U.P. + 24,5°) $Cu(NO_3)_2.3H_2O$ (prismatische Säulen; Fp. 114,5). Alle Hydrate sind zerfließlich und geben beim Erhitzen (außer Wasser) HNO_3 ab. — Cuprinitrat ist ein kräftiges Oxydationsmittel, das in der organischen Chemie bisweilen Verwendung findet; mit P gemischt bildet es eine durch Stoß explodierende Masse; in Stanniol gewickelt veranlaßt es nach einiger Zeit eine heftige, von Funkensprühen begleitete Reaktion. — Einige basische Verbindungen des Cuprinitrats sind bekannt; besonders bemerkenswert wegen seiner Schwerlöslichkeit ist das Salz $Cu(NO_3)OH.Cu(OH)_2$.

$Cu(H_2PO_2)_2$ Cuprihypophosphit; aus $CuSO_4$ und $Ba(H_2PO_2)_2$; weiß, kristallinisch; explodiert bei 90°; die wässerige Lösung zersetzt sich unter primärer Abscheidung von CuH_2.

$CuHPO_3.2H_2O$ Cupriphosphit; soll ziemlich beständig sein.

$Cu_3(PO_4)_2.3H_2O$ Cupriorthophosphat; aus $CuSO_4$ und Na_2HPO_4; blau, kristallinisch, in H_2O wenig löslich. Bekannt sind basische Verbindungen des $Cu^{\cdot\cdot}$-Phosphates.

$Cu_2P_2O_7$ Cupripyrophosphat; grünlich weißes Pulver.

$Cu(PO_3)_2$ Cuprimetaphosphat; das Anhydrid und ein Salz mit 4 Molekeln Kristallwasser sind dargestellt worden.

$Cu_3(AsO_3)_2$ Cupriarsenit und verschiedene anders zusammengesetzte Arsenite sind bekannt; sie sind in dem bei Fällung von $CuSO_4$-Lösung mit Alkaliarseniten entstehenden Scheeleschen oder Schwedischen Grün (Malerfarbe) enthalten. Ein Doppelsatz des Cupriarsenits und Cupriacetats ist dar Schweinfurter oder Pariser Grün. — Die Cupriarsenite lösen sich in KOH mit blauer Farbe auf (wahrscheinlich unter Komplexbildung).

$Cu_3(AsO_4)_2.4H_2O$ Cupriarsenat; aus $Cu(NO_3)_2$

und $Ca_3(AsO_4)_2$ bei 50°. Das Hydrat $Cu_3(AsO_4)_2 . 5H_2O$ kommt natürlich als Trichalcit vor. Bekannt sind auch saure Salze, wie z. B. $CuHAsO_4 . H_2O$. Basische Salze verschiedener Zusammensetzung finden sich in der Natur.

$Cu(SbO_2)_2$ Cupriantimonit, $Cu(SbO_3)_2 . 5H_2O$ Cuprimetaantimonat und Derivate des Pyroantimonats sind bekannt.

$CuCO_3$ Cupricarbonat; schweint nur in Form von Doppelsalzen bezw. basischen Verbindungen erhältlich zu sein. Die grünlichblauen kolloiden Niederschläge aus $CuSO_4$ und Na_2CO_3 wechselnder Zusammensetzung enthalten adsorbiertes Na_2CO_3; beim Stehen unter der Mutterlauge werden sie kristallinisch, malachitgrün und entsprechen der Zusammensetzung $3CuCO_3 . 3Cu(OH)_2 . H_2O$. Durch Aenderung des Fällungsmittels, der Zusammensetzung der Mutterlauge usw. kann man auch andere basische bezw. Doppelverbindungen erhalten. Natürlich vorkommende basische Cupricarbonate sind: Malachit, $CuCO_3 . Cu(OH)_2$; Kupferlasur (Azurit) $2CuCO_3 . Cu(OH)_2$; beide sind auch künstlich darstellbar. — Eine Reihe von Doppelverbindungen mit Alkalicarbonaten sind bekannt.

$CuSiO_3$ Cuprisilikat; die Fällungen aus $Cu^{\cdot\cdot}$-Lösungen mit Alkalisilikat sind kolloid und haben variable Zusammensetzung.

$Cu(BO_2)_2$ Cuprimetaborat; hartes blaues Glas (d 3,6) oder kristallisiert (d 3,86).

$Cu(CHO_2)_2$ Cupriformiat; blau; $Cu(CHO_2)_2 . 2H_2O$ blaugrün; das Formiat bildet auch Doppel- und basische Salze.

$Cu(C_2H_3O_2)_2 . 5H_2O$ Cupriacetat; aus CuO und Essigsäure; blaue Kristalle; geht bei 30 bis 40° in das grüne Monohydrat über. Das basische Salz $Cu(C_2H_3O_2)_2 . Cu(OH)_2 . 5H_2O$ bildet den blauen Grünspan; der grüne Grünspan ist ein Gemisch von mehreren basischen Salzen, das in der Praxis durch Einwirkung von Weinbereitungsrückständen und Luftsauerstoff auf Cu-Platten gewonnen und als Malerfarbe verwendet wird. Von Doppelsalzen ist am bekanntesten das Schweinfurter Grün (s. Cupriarsenit).

$CuC_2O_4 . \frac{1}{2}H_2O$ Cuprioxalat; amorph; bildet zahlreiche Doppelsalze.

$Cu(C_4H_4O_6) . 3H_2O$ Cupri-d-tartrat; hellgrün, wenig löslich in kaltem Wasser. Das Salz der Traubensäure $Cu(C_4H_4O_6) . 2H_2O$ ist sehr schwer löslich in kaltem Wasser.

10. Thermochemie. Bildungswärmen wichtiger Cu-Verbindungen in g-cal (Reagierende Stoffe: Cu [metallisch] O, Cl, [p für beide = 76 cm], Br [flüssig], J [fest], S [rhombisch]; resultierende Stoffe: feste Verbindungen).

$\frac{1}{2}Cu_2O$	20 400	CuO	37 160
CuCl	32 875	$CuCl_2$	51 630
CuBr	24 985	$CuBr_2$	32 580
$\frac{1}{2}Cu_2S$	9 130	CuS	8 670(?)
CuJ	16 260	CuJ_2	4 900(?)

Aus diesen Daten lassen sich folgende thermochemische Beziehungen ableiten:

$$2Cu + 2O = 2CuO + 74320 \text{ g-cal}$$
$$2Cu + O = Cu_2O + 40800 \text{ g-cal}$$
also $$Cu_2O + O = 2CuO + 33520 \text{ g-cal}$$

$$Cu + 2Cl = CuCl_2 + 51630 \text{ g-cal}$$
$$Cu + Cl = CuCl + 32875 \text{ g-cal}$$
also $$CuCl + Cl = CuCl_2 + 18755 \text{ g-cal}$$

$$Cu + 2J = CuJ_2 + 4900 \text{ g-cal}$$
$$Cu + J = CuJ + 16260 \text{ g-cal}$$
also $$CuJ + J = CuJ_2 - 11360 \text{ g-cal}$$

Aus den ersten beiden Berechnungen (und den analogen für Cu und S, oder Cu und Br) folgt die für die Gleichgewichtsverhältnisse wichtige Tatsache, daß CuO, $CuCl_2$ (CuS und CuBr) die bei niederen Cu_2O, CuCl (Cu_2S und CuBr) die bei hohen Temperaturen stabilen Verbindungsstufen darstellen. Die dritte Rechnung zeigt dagegen, daß festes CuJ_2 instabil ist in Bezug auf festes CuJ und festes J, was der Erfahrung entspricht.

Die Neutralisationswärme von festem CuO beträgt zirka 16000 g-cal.

11. Photochemie. Flammenfärbung: grün bei CuO, blau bei $CuCl_2$. Bogenspektrum: starke Linien von 2619, 3247, 3274, 4023, 4063, 5104, 5153, 5218, 5700, 5782 Ångström-Einheiten. Absorptionsspektren: Das $Cu^{\cdot}$-Ion ist farblos. Das $Cu^{\cdot\cdot}$-Ion (oder sein Hydrat) absorbiert im Rot; dieses spektrale Verhalten bleibt bisweilen unverändert, wenn die elektrolytische Dissoziation vermindert oder aufgehoben wird; es kann also das $Cu_{(II)}$ im Molekularverband das gleiche spektrale Absorptionsvermögen haben, wie im Ionenzustand; das ist z.B. der Fall beim $CuSO_4$, für dessen Lösungen das Beersche Gesetz innerhalb weiter Grenzen der Konzentration, selbst nach Zusatz von H_2SO_4, Na_2SO_4 (Verminderung der Hydrolyse und der Dissoziation), gilt. Sogar beim Uebergang in den festen Zustand scheint die spektrale Absorption des $CuSO_4$ keine Aenderung zu erfahren. Beim Nitrat und Acetat gilt das Beersche Gesetz im Blau, nicht aber im Rot; beim Uebergang des $Cu^{\cdot\cdot}$-Ions in den Molekularverband erfolgt hier also eine Aenderung im spektralen Verhalten, die vielleicht auf Hydratation zurückzuführen ist. Sehr kompliziert liegen die Verhältnisse bei den Halogeniden; steigende Konzentration und Temperatur bedingen eine erheblicheZunahme der Absorption im Blau; die Ursachen hierfür sind Komplexbildungen und Hydratationsänderungen. Die Komplexe des Cu mit

Ammoniak, Weinsäure, Glykokoll u. a. zeigen indigoblaue bis violette Farbe; weiteres siehe oben bei den Verbindungen.

Einen interessanten Beitrag zur Kenntnis der Beziehungen zwischen Absorption und Lösungszustand hat P. Vaillant geliefert. Es sei

λ die Wellenlänge, für die das Extinktionsvermögen bestimmt wird;
J_λ die Intensität des eintretenden Lichtes;
J'_λ die Intensität des durchgelassenen Lichtes;
c die Konzentration der Versuchslösung;
l die Schichtdicke der Versuchslösung;
α der Dissoziationsgrad des gelösten Salzes;
a_λ bezw. a'_λ der Extinktionskoeffizent für Kation bezw. Anion;
b_λ der Extinktionskoeffizient für die undissoziierte Molekel;

dann ist

$$J'_\lambda = J_\lambda e^{-lc[(a_\lambda + a'_\lambda)\alpha + (1-\alpha) b_\lambda]};$$

ist $a'_\lambda = 0$, was für SO_4'', NO_3', Cl' usw. im Sichtbaren zutrifft, so folgt

$$J'_\lambda = J_\lambda e^{-lc(a_\lambda \alpha + b_\lambda - \alpha b_\lambda)}$$
$$= J_\lambda e^{-lc[\alpha(a_\lambda - b_\lambda) + b_\lambda]} = J_\lambda e^{-lc x_\lambda}$$

worin $x_\lambda = \alpha(a_\lambda - b_\lambda) + b_\lambda$ ist; die lineare Beziehung zwischen x_λ und α hat sich beim Nitrat bestätigen lassen, dagegen zeigten Acetat, Chlorid und Bromid (wegen komplizierter Hydratationen und Komplexbildungen) besonders bei höheren Konzentrationen erhebliche Abweichungen. a_λ und b_λ ließen sich graphisch ermitteln, die Gleichheit von a_λ ist für Sulfat, Nitrat, Acetat, Chlorid und Bromid bewiesen worden; da $b_\lambda > a_\lambda$, wächst die Extinktion mit steigender Konzentration.

Lichtempfindlichkeit der Kupfersalze. CuCl färbt sich im feuchten Zustand am Licht (unter Bildung eines Oxychlorürs?) rot. Mit HCl gereinigte Cu-Platten färben sich unter gewissen Bedingungen im Licht schwarz. In Cl geräucherte Cu-Platten sollen zwei spektrale Empfindlichkeitsmaxima (zwischen H und M und bei D) haben.

CuBr auf Cu-Plattten, durch Einwirkung von Br-Dampf oder von $CuBr_2$-Lösung erhalten, gibt latente Bilder (s. den Artikel „Photographie") die durch chemische Entwickler hervorgerufen und mittels KCN fixiert werden können.

CuJ auf Cu-Platten, durch Einwirkung von J-Dampf erhalten, liefert mit Quecksilberdampf entwickelbare Bilder.

$CuCl_2$ wird bei Gegenwart chlorabsorbierender Stoffe, z. B. in ätherischer Lösung, zu CuCl reduziert.

$K_2CuC_4H_2O_6$ Kaliumcupritartrat in Wasser gelöst (Fehlingsche Lösung s. S. 413); scheidet im Licht Cu_2O ab, von den absorbierten Strahlen sind nur die kurzwelligen photochemisch wirksam.

12. Kolloidchemie. Kolloides Cu in Wasser kann nach der Bredigschen Methode durch „Zerstäubung" mittels eines unter Wasser brennenden Lichtbogens zwischen Cu-Elektroden erhalten werden; man bekommt ein oliv- bis braungrünes Hydrosol. Durch Reduktion von sehr verdünnter ammoniakalischer $CuSO_4$-Lösung mittels Hydrazinhydrat bezw. von verdünnter $CuSO_4$-Lösung mittels unterphosphoriger Säure entsteht ein im durchfallenden Licht blaues, im auffallenden rotbraun erscheinendes Hydrosol. Aus dem Hydrosol des CuO erhält man durch Reduktion mit Hydrazinhydrat unter Zusatz von lysalbin- oder protalbinsaurem Natrium als Schutzkolloid (C. Paal) ein in der Durchsicht rotes, in der Aufsicht schwarzes Hydrosol, das sich in feste Lamellen umwandeln läßt. Kolloides Cu in organischen Lösungsmitteln kann nach The Svedberg durch Zerstäuben von Cu im Induktoriumsfunken sowie durch die Einwirkung von ultraviolettem Licht auf Cu unter dem betreffenden Lösungsmittel erhalten werden. Das Aethersol ist fast schwarz, das Isobutylalkoholsol ist im durchfallenden Licht grünschwarz, im reflektierten blauschwarz. Die Cu-Hydrosole zeigen den Tyndall-Effekt, d. h. sie polarisieren das einfallende Licht; da der Durchmesser der Teilchen klein gegen die Wellenlänge des Lichtes ist und die Teilchen Elektrizitätsleiter sind, liegt das Polarisationsmaximum entsprechend der J. J. Thomsonschen Forderung um 120° zur Richtung des einfallenden Lichtbündels geneigt.

Kolloides Cu_2O entsteht bei den chemischen Methoden zur Bereitung von kolloidem Cu als Zwischenprodukt; sein Hydrosol zeigt gelbliche bis rötliche Farbe. Im festen Zustand läßt es sich durch Erhitzen des festen CuO-Sols im H_2-Strom auf 150° erhalten.

Kolloides CuO entsteht aus Lösungen des Cu-Salzes des Succinimids bei längerem Stehen oder Erwärmen auf 70°; das Hydrosol ist dunkelbraun. Aus Cu-Salzlösungen, protalbinsaurem oder lysalbinsaurem Natrium und Alkali enststehen blauviolette Lösungen, die durch Dialyse in braunes CuO-Hydrosol übergehen; Eindampfen liefert schwarze Lamellen.

Kolloides CuS kann aus H_2S und Glykokollkupfer erhalten werden; in der Kälte entsteht ein in der Durchsicht rein braunes, in der Hitze ein olivengrünes Hydrosol. Ferner sind kolloid erhalten wurden: CuS, $Cu(N_3)_2$, $CuFe(CN)_6$.

Kupfergläser. Das Kupferrubinglas enthält äußerst kleine Cu-Kügelchen; das Aventuringlas (bei niedriger Temperatur) kolloides Cu und Cuprisilikat (bei hoher Temperatur Cuprosilikat), Porpora (Hämatinon) kolloides Cu_2O oder Cu; Cu-Glasuren

(rouge flambé) wahrscheinlich kolloides Cu, daneben vielleicht Cu_2O und Silikate).

Literatur. *F. G. Donnan, Kupfer. In Abegg's Handbuch der anorganischen Chemie II 1, Leipzig 1908. — Fr. Peters, Kupfer. In Gmelin-Kraut-Friedheim-Peters' Handbuch der anorganischen Chemie V 1, Heidelberg 1909.*

K. Schaum.

g) Silber.

Argentum. Ag. Atomgewicht 107,88.

1. Atomgewicht. 2. Vorkommen. 3. Geschichte. 4. Darstellung. 5. Formarten und allotrope Modifikationen. 6. Verbindungen und Legierungen mit anderen Metallen. 7. Elektrochemie. 8. Analytische Chemie. 9. Spezielle Chemie. 10. Thermochemie. 11. Photochemie. 12. Kolloidchemie.

1. Atomgewicht. 107,88 (Internationale Atomgewichtskommission 1912). Gründe für die Wahl eines Wertes von ca. 108: Ag reiht sich am besten in Reihe 6 der Gruppe I des periodischen Systems (vgl. den Artikel „Chemische Elemente") ein; es ist isomorph mit Cu und Au, seine Verbindungen häufig mit denen von Na und Cu. Die Atomwärme des metallischen Ag wird 6,0 bis 6,1 bei Annahme des Atomgewichtswertes ca. 108. Dampfdichtebestimmungen an AgCl, das Verhalten der Lösungen von Silberverbindungen u. a. stehen mit jener Atomgewichtswahl in Uebereinstimmung. — Die älteren, sehr zahlreichen Bestimmungen des Atomgewichts des Silbers rühren besonders von Berzelius, Marignac und Stas her; die verwendeten Methoden beruhten auf der Ermittelung der Verhältnisse Ag:3O in $AgXO_3$, oder Ag:MeX, oder Ag:X, oder Ag:MeX (Me = K, Na; X = Cl, Br, J). Die Resultate der genannten Forscher wurden besonders von Clarke berechnet. Die modernste und zuverlässigste Bestimmung des Atomgewichts für Silber verdanken wir Th. W. Richards und Forbes, die das Verhältnis $Ag:AgNO_3$ durch Synthese von Silbernitrat aus reinstem Silber ermittelten; es ergab sich der Wert 107,883.

2. Vorkommen. a) Metallisch; Ag findet sich in der Natur gediegen (enthaltend Au [„güldisches Silber"] Cu; bisweilen A, As, Sb; Fe, Co, Bi) auf Gängen und Lagen zusammen mit Ag-Verbindungen, aus denen es wohl durch Reduktion mittels organischer Substanzen entstanden ist; es bildet haar-, drahtförmige und ähnliche Aggregate, oder verzerrte Würfel und Oktaeder. Fundorte: Harz, Erzgebirge, Mexiko, Peru, Chile. Feste Silberamalgame finden sich in der Pfalz, bei Oberlahnstein, in Schweden, Chile, Peru, Britisch Columbia. b) In Verbindungen; als: Ag_2S Silberglanz (Glaserz, Argentit); $5Ag_2S.Sb_2S_3$ Sprödglaserz; $3Ag_2S.As_2S_3$ lichtes Rotgültigerz; $3Ag_2S.Sb_2S_3$ dunkles Rotgültigerz; $Ag_2S.Sb_2S_3$ Miargyrit; $Ag_2S.Cu_2S$ Silberkupferglanz; $Ag_2S.Bi_2S_3$ Silberwismutglanz; $4Ag_2(Cu_2, Fe,Zn,Hg)S.Sb_2S_3$ Silberfahlerze (lichtes und dunkles Weißgültigerz); $9[8](Ag,Cu)_2S.(Sb,As)_2S_3$ Polybasit; $4Ag_2S.GeS_2$ Argyrodit; AgCl Hornsilber; AgTe.AuTe Schrifterz (Silvanit); ferner kommen zahlreiche seltenere Ag-Verbindungen in der Natur vor. Einzelne vulkanische Aschen enthalten geringe Mengen von Ag; in den Wässern kann Ag wegen der Schwerlöslichkeit des AgCl nur in minimalen Quantitäten vorkommen; Meerwasser enthält 1 mg auf 100 l.

Schwefelhaltige Erze besitzen oft einen erheblichen Gehalt an Ag, besonders Bleiglanz, Zinkblende, Kupferkies (und die schon erwähnten Fahlerze usw.). Asche von Landpflanzen enthält etwas Ag; einzelne Fucusarten weisen größere Mengen auf; in Pocillopora alcicornis und in der Asche des Ochsenblutes wurden kleine Quantitäten von Ag gefunden.

Physiologische Wirkungen des Ag. Die löslichen Ag-Salze sind giftig; das stark ätzende Nitrat (Höllenstein) findet in der Medizin mannigfache Anwendungen, ebenso die kolloiden Lösungen des metallischen Ag (s. unten „Kolloidchemie").

3. Geschichte. Das Silber ist, da es in der Natur gediegen vorkommt, schon seit den ältesten Zeiten bekannt; bereits in den Büchern Mosis wird es erwähnt. Die Alchemisten nannten es (wegen seines Glanzes) Luna oder Diana und gaben ihm das Symbol ☽.

4. Darstellung. 1. Treibprozeß (Kupellation). Das bei der Reduktion silberhaltiger Bleierze entstandene „Werkblei" wird in geschmolzenem Zustand der Einwirkung von Luft ausgesetzt; das dabei entstehende Bleioxyd fließt als „Glätte" ab, während das Silber zurückbleibt. Das Ende des Vorgangs wird durch das Verschwinden des Oxydüberzuges und das Auftreten des weißen Metallglanzes des Silbers („Silberblick") angezeigt.

2. Pattisonieren. Ist das Werkblei sehr arm an Silber, so läßt man es langsam erstarren; dabei scheidet sich reines Blei aus und die Mutterlauge reichert sich an Silber an. Die übrigbleibende Mutterlauge bezw. das eutektische Gemisch (vgl. die Artikel „Lösungen", „Legierungen") muß nach dem Treibprozeß o. dgl. weiter verarbeitet werden.

3. Parkesieren. Man setzt dem geschmolzenen Werkblei Zink zu; Blei und Zink mischen sich in geschmolzenem Zu-

stand fast gar nicht. Das Silber ist nun in flüssigem Zink viel löslicher als in flüssigem Blei. Die beim Abkühlen auf der Oberfläche des geschmolzenen Bleies erstarrende Zinksilberlegierung („Zinkschaum") wird abgehoben und destilliert, wobei das Zink übergeht und eine Bleisilberlegierung zurückbleibt, die nach dem Treibprozeß o. dgl. weiter verarbeitet wird.

4. Amalgamation. Die zerkleinerten Erze werden unter Zusatz von Kochsalz und etwas Kupfersulfat geröstet; dabei entsteht Chlorsilber, das durch Kupferspäne oder durch Eisen reduziert und dann mit Quecksilber amalgamiert wird; das Amalgam hinterläßt bei der Destillation das Silber.

5. Andere Verfahren beruhen auf der Lösung des nach 4 gewonnenen Chlorsilbers in KCN, Thiosulfat o. dgl., und Niederschlagen des Ag durch Cu bezw. durch Elektrolyse; oder auf vorsichtigem, Silbersulfat u. a. lieferndem Rösten der Erze; das Silbersulfat wird mit Wasser ausgezogen und das Ag durch Cu o. dgl. abgeschieden.

Das im Silber enthaltene Gold wird durch einen elektrolytischen Prozeß („Möbiusprozeß") gewonnen.

Silber findet Verwendung als Münzmetall, als Tafelgerät, für Schmucksachen; ferner dienen seine Salze zum Herstellen von lichtempfindlichen Schichten in der Photographie, als Reagenzien in der Analyse, und — ebenso wie die kolloiden Lösungen des Ag-Metalles — in der Medizin. Bemerkenswert ist, daß das Ag hinsichtlich der Leitfähigkeit für Wärme und Elektrizität an der Spitze aller Metalle steht.

5. Formarten und allotrope Modifikationen. Deren physikalische Eigenschaften und Konstanten. Ag kristallisiert kubisch hexakisoktaedrisch; beim Sublimieren und Schmelzen bilden sich Oktaeder; bei der Elektrolyse mannigfaltige Formen. Es schmilzt bei ca. 961°; bei beginnender Weißglut ist es etwas flüchtig; es siedet bei etwa 2050° (im Kathodenvakuum bei ca. 1400°). Eigentliche allotrope Modifikationen des Silbers sind nicht bekannt. Ueber die farbigen und wasserlöslichen Ag-Modifikationen s. unter „Kolloidchemie". Die physikalischen Eigenschaften des Ag sind von der Vorbehandlung (Walzen, Hämmern, Erhitzen, Erstarrenlassen usw.) abhängig.

Dichte: reinstes Ag (destilliert) d_4^{20} 10,49; durch Hämmern, Pressen und auch durch Gasabsorption im geschmolzenen Zustand wird der Wert geändert. Härte 2,5 bis 3 nach der Mohsschen Skala. Eindringungswiderstand 59 (Cu 74, Pb 5,7, Stahl 107 bis 232) Kompressibilität $0{,}71 \cdot 10^{-6}$ Vol. pro Atm.

Dehnbarkeit sehr groß; läßt sich zu Folie bis zu einer Dicke von 0,0027 mm aushämmern. Silber-Filigrandraht kann so dünn ausgezogen werden, daß 1 km nur 0,5 g wiegt. Elastizitätsmodul 5900 bis 7800 kg (je nach der Sorte) pro qmm bei 15°. Zugfestigkeit 16 bis 29 kg (je nach der Sorte) pro 1 qmm Querschnitt. Spezifische Wärme 0,056. Linearer Ausdehnungskoeffizient zwischen 0° und 100° ca. $1936 \cdot 10^{-8}$. Wärmeleitung in C.G.S.-Einheiten und g-cal zwischen 10° und 97°: 0,963. Schmelzwärme 24,7 g-cal pro g. Magnetisches Verhalten: diamagnetisch. Elektrische Leitfähigkeit: spezifische Leitfähigkeit ca. $0{,}6200 \cdot 10^6$ reziproke Ohm für den Würfel von der Kantenlänge 1 cm. Thermoelektrisches Verhalten: ziemlich stark negativ.

Farbe: In kompaktem Zustand das am reinsten weiße Metall. In feinverteiltem resp. kolloidem Zustand variiert die Farbe außerordentlich. Durchlaßfarbe: In dünnen Schichten auf Glas violett, blau bis blaugrün; in dickeren Schichten gelb bis gelbbraun; im Ultraviolett wird das Gebiet 3350 bis 3070 Ångström-Einheiten von dünnen Spiegeln (auf Quarz) durchgelassen. Ag-Dampf ist blaßblau.

Refraktion: $n_{(\text{mittlere})}$ 0,27.

Molargewicht: Ag-Dampf liefert Werte zwischen 107 bis 111; d. h. die Dampfmolekel des Ag ist einatomig.

Absorption: Geschmolzenes Ag löst Sauerstoff auf; beim Erkalten scheidet sich sauerstoffarmes kristallisiertes Ag aus; nach der Erstarrung der Oberfläche entweicht im Innern der Sauerstoff in Form von Blasen, welche die Decke unter Bildung von Eruptionskratern durchbrechen („Spratzen").

Lösungen. Wichtig sind nur die Legierungen, die im folgenden Abschnitt besprochen werden.

6. Verbindungen und Legierungen mit anderen Metallen (vgl. den Artikel „Legierungen"). Ag legiert sich mit Ca, Mg, Al, Sb, Bi, Zn, Cd, Sn, Pb, Ni, Cu.

Von Verbindungen sind nachgewiesen: $AgMg_3$, $AgMg$, Ag_2Al, Ag_3Al, Ag_3Sb, Ag_2Zn_3 (u. a.), $AgCd$, Ag_2Cd_3 (u. a.), Ag_3Sn (u. a.).

Ag-Al-Legierungen. Die Legierung mit 97 Al und 3 Ag ist rein weiß, wird von H_2S nicht angegriffen; die mit 95,2 Al und 4,8 Ag ist härter und politurfähiger als reines Ag; die mit 50 Al und 50 Ag ist hart wie Bronze.

Ag-Sn-Legierungen. Diese Legierungen sind außerordentlich hart, einzelne von ihnen auch spröde.

Ag-Pb-Legierungen. Diese Legierungen sind nicht homogen; die Legierung mit 95 Ag und 5 Pb ist fast weiß mit grauem Bruch; die Pb-reicheren sind grau bis bläulich-grau.

Ag-Ni-Legierungen. Während schmel-

zendes Ni erhebliche Mengen von Ag aufnimmt, löst sich Ni fast gar nicht in geschmolzenem Ag.

Ag-Cu-Legierungen. Ag und Cu lassen sich in allen Verhältnissen mischen; die Legierungen sind aber nicht ganz homogen. Der Gehalt an Cu macht das Ag härter und zäher, ohne die Dehnbarkeit erheblich zu beeinträchtigen; die Farbe ist selbst bei 20 Ag und 80 Cu noch nicht ganz kupferrot. Die deutschen Silbermünzen enthalten 90 Ag und 10 Cu.

7. **Elektrochemie.** Silber bildet vorwiegend Verbindungen, in denen es einwertig auftritt; in einzelnen Verbindungen, z. B. im Silbersuperoxyd Ag_2O_3 ist es dreiwertig; zweiwertiges Ag (dem $Cu_{(II)}$ entsprechend) ist nicht bekannt. Das Ion der Verbindungen des $Ag_{(I)}$ ist das Argentiion $Ag^{\cdot}$; außer diesem ist noch die Existenz eines Argentoions $Ag_2^{\cdot}$ oder $Ag_3^{\cdot}$ nachgewiesen worden; erhitzt man nämlich feinverteiltes Ag mit $AgNO_3$-Lösung, so scheidet diese beim Erkalten feine Silberkriställchen ab; es stellt sich also in Silbersalzlösungen bei Anwesenheit von metallischem Ag ein Gleichgewicht $Ag + Ag^{\cdot} \leftrightarrows Ag_2^{\cdot}$ her, das mit steigender Temperatur nach der rechten Seite verschoben wird (vgl. den Artikel „Kupfer"). Das Argentiion (bezw. sein Hydrat) ist farblos.

Elektrochemie der Silbersalze. Bei unendlicher Verdünnung ist die relative Wanderungsgeschwindigkeit (vgl. den Artikel „Elektrische Leitfähigkeit") $l_{(Ag^{\cdot})_{18^0}}$ 54,3; die absolute Wanderungsgeschwindigkeit $U_{(Ag^{\cdot})_{18^0}} = 0{,}000455$ cm/sec bei einem Potentialgefälle von 1 Volt/cm. Durch 1 Coulomb/sec werden aus $Ag^{\cdot}$-Lösungen ausgeschieden 0,0011180 g Ag.

Setzt man ε (Volt) für $Hg/HgCl/KCl_{1n} = + 0{,}56$ Volt, so ist bei 25° ε (abs) für $Ag/Ag^{\cdot}_{1n} = + 1{,}075$ Volt; auf die Wasserstoffnormelektrode bezogen wird der Wert $\varepsilon_{(h)} = + 0{,}798$ Volt. Aus der Nernstschen Formel

$$\varepsilon = \frac{0{,}0002\,T}{n} \log^{10} \frac{P}{p}$$

(T = absolute Temperatur; n = Elektrovalenz des Kations; P = Lösungsdruck des Metalls; p = osmotischer Druck der Kationen) ergibt sich

$$P_{25^0} = \text{etwa } 2 \cdot 10^{-17}$$

(vgl. dazu den Artikel „Potential [elektrochemisches]"). Das Ag steht also unter gewöhnlichen Verhältnissen in der elektrochemischen Spannungsreihe zwischen Hg und Au; es besitzt demnach nur geringe Elektroaffinität, was sich in der Neigung zur Komplexbildung kundgibt. Das Ag kann aber seine Stellung in der Spannungsreihe wesentlich ändern, wenn die Konzentration der $Ag^{\cdot}$-Ionen äußerst niedrig (durch Bildung von Komplexen bezw. sehr schwer löslichen Verbindungen) gehalten wird (vgl. dazu die entsprechenden Verhältnisse beim Artikel „Kupfer"). Die Bedingungen zur elektrolytischen Trennung des Ag von anderen Metallen werden durch seine Stellung in der Spannungsreihe dargelegt.

In der Helmholtzschen Gleichung

$$F\varepsilon = q - FT\frac{d\varepsilon}{dT}$$

(F = 96540 Coulomb; vgl. dazu der Artikel „Galvanische Ketten") ist für die Abscheidung von 1 g-Atom Ag an einer Ag-Kathode in 1 n $AgNO_3$-Lösung der Gewinn an elektrischer Energie

$$F\varepsilon = + 23800 \text{ g-cal.}$$

der Peltier-Effekt $\quad FT\frac{d\varepsilon}{dT} = - 2600$ g-cal.

also beträgt die Ionisierungswärme

$$q = - 26400 \text{ g-cal.}$$

Angewandte Elektrochemie des Ag. Silbercoulometer (-voltameter). Durch Elektrolyse von $AgNO_3$-Lösung zwischen Ag-Elektroden und Wägen der kathodisch abgeschiedenen Ag-Menge läßt sich die in einem bestimmten Zeitintervall durch den Querschnitt des Stromkreises gegangene Elektrizitätsmenge ermitteln. — Aus den Lösungen des $KAg(CN)_2$ (s. unten) scheidet sich bei der Elektrolyse das Silber in Gestalt eines zusammenhängenden Ueberzuges ab; von dieser Tatsache wird in der Galvanostegie Gebrauch gemacht.

Komplexverbindungen. Das $Ag^{\cdot}$-Ion bildet mit Ammoniak und seinen Derivaten, mit Thiosulfat-, Cyan-, Rhodan-, Nitrit- und Halogen-Ionen komplexe Ionen von zum Teil großer Beständigkeit; darauf beruht die Auflösung schwer löslicher Silbersalze durch Ammoniak, Thiosulfat, Cyankalium usw. Nachgewiesen worden sind (durch Löslichkeitsversuche, durch Potentialmessungen usw.) die Ionen $Ag(NH_3)^{\cdot}_2$, $Ag(S_2O_3)_2'''$, $Ag(S_2O_3)_3'''''$, $Ag(CN)_2'$, $Ag(CN)_3''$, $Ag(CNS)_2'$, $Ag(CNS)_4'''$, Ag_2J_4'', AgJ_4'''. Für die Ermittelung der Zusammensetzung der Komplexionen dienen auf Gleichgewichts- bezw. Potentialmessungen beruhende Methoden, deren Grundgedanken nach den Arbeiten von G. Bodländer bezw. H. Euler skizziert werden mögen.

1. Es sei die Formel des Komplexes $Ag_n(NH_3)_m$; dann haben wir in der Lösung z. B. von Chlorsilber in Ammoniak das Gleichgewicht

$$k = \frac{[Ag^{\cdot}]^n\,[NH_3]^m}{[Ag_n(NH_3)_m]^{n\cdot}}$$

ferner ist das Löslichkeitsprodukt des Chlorsilbers

$$L = [Ag^{\cdot}]\,[Cl'];$$

es folgt

$$\frac{k}{L^n} = \frac{[NH_3]^m}{[Cl']^n\,[Ag_n(NH_3)_m]^{n\cdot}} = \text{konst.}$$

Mit Hilfe dieser Beziehung lassen sich durch Bestimmung der Konzentration von $Ag_n(NH_3)_m$ bei konstanter NH_3- und variabler Cl'-Konzentration, sowie durch Ermittelung der Löslichkeit von Chlorsilber in Ammoniak bei Abwesenheit von Cl'-Ionen unter variabler NH_3-Konzentration die Exponenten m und n finden.

2. Es seien zwei Ag-Elektroden gegeneinandergeschaltet, die in NH_3-Lösung von bestimmter Konzentration, aber verschiedenem Gehalt an Komplexion tauchen; dann ist

$$k = \frac{[Ag^\cdot]_1{}^n\,(NH_3)^m}{[Ag^n(NH_3)^m]_1{}^{n\cdot}}$$

$$k = \frac{[Ag]_2{}^n\,[NH]_3{}^m}{[Ag^n(NH_3)^m]_2{}^{n\cdot}}$$

also

$$\frac{[Ag_n\,(NH_3)_m]_1{}^{n\cdot}}{[Ag_n\,(NH_3)_m]_2{}^{n\cdot}} = \frac{[Ag^\cdot]_1{}^n}{[Ag^\cdot]_2{}^n}$$

Die Konzentration $\frac{[Ag^\cdot]_1}{[Ag^\cdot]_2}$ ergibt sich aus der elektromotorischen Kraft der „Konzentrationskette" (vgl. den Artikel „Galvanische Ketten"), es läßt sich also n nach der Gleichung

$$\varepsilon = 0{,}058 \log \frac{[Ag^\cdot]_1}{[Ag^\cdot]_2} = \frac{0{,}058}{n} \log \frac{[Ag_n(NH_3)_m]_1{}^{n\cdot}}{[Ag_n(NH_3)_m]_2{}^{n\cdot}}$$

finden. Sodann kann man an Konzentrationsketten, die bei gleicher Konzentration von Komplexion variable NH_3-Mengen enthalten, m erhalten, da sich ganz analog wie oben die Beziehungen

$$\frac{[Ag^\cdot]_1{}^n}{[Ag^\cdot]_2{}^n} = \frac{[NH_3]_1{}^m}{[NH_3]_2{}^m}$$

und

$$\varepsilon = 0{,}058 \log \frac{[Ag^\cdot]_1}{[Ag^\cdot]_2} = 0{,}058\,\frac{m}{n} \log \frac{[NH_3]_2}{[NH_3]_2}$$

ergeben. Für das gelöste Chlorsilberammoniak wurde auf diesem Wege die Formel $Ag(NH_3)_2{}^\cdot Cl'$ gefunden. Die komplexe Konstante k dieser Verbindung ergibt sich durch Kombination der Beziehungen

$$k = \frac{[Ag^\cdot]\,[NH_3]^2}{[Ag(NH_3)_2]^\cdot}$$

und

$$L = [Ag^\cdot]\,[Cl']$$

zu etwa $6{,}4 . 10^{-8}$; man nennt den reziproken Wert einer Zahl die „Beständigkeitskonstante" des Komplexions. Folgende Zusammenstellung gibt ein Bild von der relativen Beständigkeit wichtiger Komplexionen des Silbers:

Komplexionen	$Ag(CN)_3{}''$	$Ag(CN)_2{}'$	$Ag(S_2O_3)'''\,''$
Beständigkeitskonstante	$0{,}96 . 10^{22}$	$1{,}1 . 10^{21}$	$3{,}45 . 10^{13}$
	$Ag(S_2O_3)'''$	$Ag(CNS)_4{}'''$	$Ag(CNS)'$
	$0{,}98 . 10^{13}$	$1{,}5 . 10^{11}$	$6 . 10^9$
	$Ag(NH_3)_2{}^\cdot$	$Ag_2J_4{}''$ bis $AgJ_4{}'''$	$Ag(NO_2)_2{}'$
	$1{,}6 . 10^7$	$7{,}7 . 10^3$	$6{,}8 . 10^2$

Aus den Lösungen der Komplexionen des Silbers erhält man gut kristallisierende Verbindungen wie $KAg(CN)_2$, $KAgJ_2$, $Na_2Ag_2(S_2O_3)_2 . H_2O$, $Ag(NH_3)_2NO_3$, $Ag(NH_3)Cl$, $Ag_2(NH_3)_3Cl_2$ usw.; es ist besonders bemerkenswert, daß hinsichtlich der Zusammensetzung der festen Komplexsalze und den in ihren Lösungen prävalierenden Komplexionen keine Uebereinstimmung herrscht (vgl. die festen Ammoniakate des Chlorsilbers und das in der Lösung nachgewiesene Komplexion $Ag(NH_3)^\cdot{}_2$).

Hydrolyse. Das in der wässerigen Lösung von Ag_2O enthaltene Silberhydroxyd ist eine starke Base; dementsprechend zeigen die Ag-Salze starker Säuren (im Gegensatz zu den meisten Schwermetallsalzen) keine Hydrolyse und neutrale Reaktion. Basische und saure Salze können sich unter gewissen Bedingungen bilden.

8. **Analytische Chemie.** Qualitativer Nachweis:

Mit HCl, NaCl usw; weißer Niederschlag von AgCl, der sich im Licht grau bis violettgrau färbt.

Quantitative Bestimmung:

1. als AgCl, durch Fällen mit geringem Ueberschuß von HCl, NaCl usw.; Wägen als AgCl;
2. als Ag_2S, durch Fällen mittels H_2S;
3. als metallisches Ag, durch Fällen mittels Hydroxylamin oder durch Ausscheidung mittels Cd, Al od. dgl.;
4. elektrolytisch als metallisches Ag; am besten aus KCN-Lösung; die Trennung von den meisten anderen Metallen läßt sich durch die Wahl einer geeigneten Badspannung (s. „Elektrolyse" im Artikel „Elektrochemie") ausführen; bei der Anwesenheit von Hg sind Kombinationen mit anderen Trennungsverfahren nötig.
5. maßanalytisch a) durch Titration mittels NaCl; am besten unter Verwendung von K_2CrO_4 als Indikator; b) durch Titration mittels KCNS unter Verwendung von Ferrisalz (Eisen(III)alaun) als Indikator.

Löslichkeitsverhältnisse. Die Schwerlöslichkeit nimmt für Silberverbindungen nach der Reihe: Chlorsilber, Cyansilber, Rhodansilber, Bromsilber, Jodsilber,

Schwefelsilber zu; die (aus Leitfähigkeits- und Potentialmessungen berechnete) Konzentration der $Ag^{\cdot}$-Ionen in Grammionen pro Liter beträgt bei 25° für AgCl $1{,}5.10^{-5}$, AgCN $2{,}2.10^{-6}$, AgCNS $1{,}08.10^{-6}$, AgBr $7{,}15.10^{-7}$, AgJ $1{,}05.10^{-8}$, Ag_2S $1{,}0.10^{-17}$.

9. Spezielle Chemie. Wirkung von Salzen, Säuren, Basen, Gasen usw. auf Ag. $H^{\cdot}$-Ionen können durch Ag, wie die elektrolytischen Potentiale zeigen, nur in minimalen Quantitäten ausgeschieden werden; wird der H_2 aber wegoxydiert, so geht Ag unter Bildung der entsprechenden Salze in Lösung, z. B. in HNO_3 (Nebenprodukte NO, NO_2, N_2O_3) und in starker (warmer) H_2SO_4 (Nebenprodukt SO_2). Auch wenn die $Ag^{\cdot}$-Ionenkonzentration auf einem niedrigen Wert gehalten wird, z. B. durch Bildung von schwerlöslichen Niederschlägen, wird das Ag angegriffen; das ist der Fall bei den Halogenwasserstoffsäuren, besonders bei HJ.

H_2S greift Ag schon bei gewöhnlicher Temperatur unter Schwarzfärbung an; ebenso H_2Se. HClO und $HClO_3$ bilden AgCl und O, bezw. AgCl und $AgClO_3$.

Von NaOH, selbst von schmelzendem, wird Ag wenig angegriffen; KOH wirkt etwas mehr ein; sehr energisch greifen Na_2O_2 (geschmolzen) und K_2O_4 (in der Hitze) an. Von schmelzendem Glas wird Ag gelöst. Geschmolzenes NaCl führt Ag in AgCl über. Wässeriges KCN löst unter Mitwirkung des Luftsauerstoffs Ag auf. Lösliche Metallsulfide bilden auf Ag eine Schicht von Ag_2S. (ebenso gewisse organische Schwefelverbindungen). Besonderes Interesse bietet das in wässerigen Lösungen von Ferro- und Silbersalz im Dunkeln sich einstellende Gleichgewicht

$$Fe^{\cdot\cdot} + Ag^{\cdot} \rightleftarrows Fe^{\cdot\cdot\cdot} + Ag\,(met);$$

die Konstante

$$k = \frac{[Fe^{\cdot\cdot}]\,[Ag^{\cdot}]}{[Fe^{\cdot\cdot\cdot}]}$$

ist bei 25,5° zu 0,01 gefunden worden. (Im Licht treten Komplikationen auf; auch ist überhaupt die Form bezw. die Beschaffenheit des sich abscheidenden metallischen Ag von Einfluß.)

O greift unter normalem Druck weder bei gewöhnlicher noch bei hoher Temperatur an; das Silber ist ein edles Metall; wohl aber wirkt O unter erhöhtem (den Dissoziationsdruck des Ag_2O übersteigendem) Druck auf Ag ein. Ozon oxydiert das Ag zu Silberperoxyd. S wirkt bes. in der Hitze unter Bildung von Ag_2S auf Ag ein; dagegen ist eine Lösung von S in CS_2 fast ohne Wirkung.

Cl als Gas und in wässeriger Lösung führt Ag in AgCl über; die Einwirkung des gasförmigen Cl verläuft auch bei Rotglut noch nicht sehr schnell. Analog wirkt Br. J vereinigt sich in der Hitze mit Ag zu AgJ. Gasförmiges HCl wirkt bei hohen Temperaturen unter Herstellung eines Gleichgewichtes $2Ag + 2HCl \rightleftarrows 2AgCl + H_2$ ein. N und H sind ohne Einwirkung, werden auch nur ganz wenig von Ag gelöst.

Die wichtigsten Silberverbindungen.

I. Argentoverbindungen.

Ag_2F Silbersubfluorid; entsteht durch Eintragen von feinverteiltem Ag in eine gesättigte Lösung von AgF in der Wärme; bronzefarbenes Pulver.

Ag_4O Silbersuboxyd soll aus Ag_2F durch Einwirkung von H_2O-Dampf bei 180° und auf verschiedenen anderen Wegen entstehen. Sonstige Argentoverbindungen sind nicht isoliert worden; nachgewiesen ist ihre Bildung in verschiedenen Fällen, z. B. bei der Einwirkung von heißen Silbersalzlösungen auf metallisches Silber (s. oben S. 423); vielleicht sind in den sogenannten Photohaloiden (s. unten 11 unter „Photochemie" und 12 „Kolloidchemie") Argentohaloide (Silbersubhaloide) enthalten.

II. Argentiverbindungen.

AgF Silberfluorid; entsteht durch Auflösen von Ag_2O in HF; gelbe (?) amorphe oder kristallinisch-blätterige Masse.

$d^{15,5}$ 5,85; leicht löslich in Wasser; stark elektrolytisch dissoziiert. Ag_2O ist in AgF-Lösung unter Bildung des Komplexes $(Ag_2OH)^{\cdot}$ löslich; die Lösung reagiert alkalisch. Durch seine große Löslichkeit in Wasser und seine Lichtbeständigkeit unterscheidet sich das AgF stark von den übrigen Silberhaloiden. Aus wässeriger Lösung scheiden sich die Hydrate $AgF.H_2O$ und $AgF.2H_2O$ ab. Aus HF-Lösungen erhält man die sauren Salze AgF.HF und AgF.3HF.

AgCl Silberchlorid (Chlorsilber); entsteht durch Fällen einer $Ag^{\cdot}$-Ionenlösung mittels Cl'-Ionen als weißer, sich rasch zusammenballender Niederschlag, der später pulverig wird; amorph; Fp. 480 bis 490°. d (der erstarrten Schmelze) 5,45 bis 5,59. Kristallisiert (regulär) findet AgCl sich in der Natur als Hornsilber; d 5,31 bis 5,55; aus dem amorphen AgCl läßt sich die kristallisierte Form durch Auflösen in HCl oder NH_4OH und Verdunstenlassen erhalten. Der Dampf des AgCl erweist sich als zum Teil polymerisiert. AgCl ist in H_2O schwer löslich (s. unter 8); relativ leicht in konzentriertem HCl (etwa 1 Teil AgCl in 200 Teilen HCl).

Ueber die Löslichkeit des amorphen pulverigen AgCl in verschiedenen Lösungen gibt die Tabelle auf S. 426 oben einen Ueberblick.

Die Dissoziationsspannung des Cl über AgCl bei Zimmertemperatur berechnet sich (aus elektrometrischen usw. Daten) zu 6.10^{-40}

Lösungsmittel	Konzentration	100 g der Lösung nehmen auf g AgCl	Temperatur Grad
NH_3	3%	1,40	20
NH_3	15%	7,58	20
KCl	gesättigt	0,05	18
NaCl	,,	0,10	18
NH_4Cl	,,	0,16	18
$CaCl_2$	,,	0,09	18
$MgCl_2$	,,	0,17	18
$Na_2S_2O_3$	1 : 100	0,40	20
$Na_2S_2O_3$	20 : 100	6,10	20
$(NH_4)_2S_2O_3$	1 : 100	0,57	20
$(NH_4)_2S_2O_3$	10 : 100	3,92	20
Na_2SO_3	10 : 100	0,44	25
$(NH_4)_2CO_3$	10 : 100	0,05	25
KCN	5 : 100	2,75	25
NH_4CNS	5 : 100	0,08	20
NH_4CNS	10 : 100	0,54	20
KCNS	10 : 100	0,11	25
Thiocarbamid	10 : 100	0,83	25
Thiosinamin	1 : 100	0,40	25
Thiosinamin	10 : 100	3,90	25

Atmosphären; für 300° ergibt sich (aus thermochemischen usw. Daten) der Dissoziationsdruck zu $7,8.10^{-37}$.

AgCl kann auch durch Einwirkung von Cl auf AgBr, AgJ und Ag_2S erhalten werden; ferner aus $AgNO_3$ (in Lösung) und Cl_2 nach der Gleichung

$$6AgNO_3 + 3Cl_2 + 3H_2O = 5AgCl + AgClO_3 + 6HNO_3.$$

AgCl wird beim Schütteln unter Wasser bezw. verdünnter HCl oder H_2SO_4 durch die meisten Metalle (vgl. den Artikel „Potential [elektrochemisches]“) zu Ag reduziert. Auch durch organische Reduktionsmittel läßt es sich leicht in Ag überführen. Ueber die Lichtempfindlichkeit des AgCl s. unter 11 „Photochemie“.

Die kristallisierten Ammoniakate $2AgCl.3NH_3$ und $AgCl.3NH_3$, welche aus Lösungen des AgCl in NH_4OH auskristallisieren (aber nicht den in der Lösung prävalierenden Komplexionen entsprechen), besitzen meßbare Dissoziationsdrucke.

AgBr Silberbromid (Bromsilber). Es entsteht durch Fällen von Ag˙-Ionenlösungen mittels Br′-Ionen als weiß bis gelb erscheinender Niederschlag, der erst käsig oder flockig, später pulverig ist (die einzelnen sogenannten „Modifikationen“ sind nur durch ihren Dispersitätsgrad, Gehalt an fremden Stoffen usw. unterschieden); amorph; Fp. 426°; d des gefällten AgBr 6,39 bis 6,52; des erstarrten Schmelzflusses 6,32 bis 6,49. Kristallisiert sind das natürlich vorkommende Bromsilber (regulär?) sowie zwei aus Ammoniaklösungen durch Wasserfällung (hexagonal) bezw. Verdunsten (regulär) abscheidbare Formen. AgBr ist in H_2O sehr schwer löslich (s. unter 8); relativ leicht in konzentriertem HBr und HCl. Ueber die Löslichkeit in verschiedenen Lösungen gibt folgende Tabelle Aufschluß:

Lösungsmittel	Konzentration	100 g der Lösung nehmen auf g AgBr	Temperatur
$Na_2S_2O_3$	1 : 100	0,35	20
$Na_2S_2O_3$	20 : 100	5,80	20
Na_2SO_3	10 : 100	0,04	20
KCN	5 : 100	6,55	25
NH_4CNS	5 : 100	0,21	20
NH_4CNS	10 : 100	2,04	20
KCNS	10 : 100	0,73	25
Thiocarbamid	10 : 100	1,87	25
Thiosinamin	1 : 100	0,08	25
Thiosinamin	10 : 100	0,72	25

Die Reaktion zwischen Ag und gasförmigem HBr ist umkehrbar. Duch gasförmiges Cl wird AgBr in der Wärme in AgCl verwandelt (langsamer als AgJ). Beim Behandeln des AgBr mit Cl′-Ionenlösungen stellt sich ein Gleichgewicht $AgBr + Cl' \rightleftarrows AgCl + Br'$ her, das durch Bildung von festen Lösungen zwischen AgCl und AgBr kompliziert wird. Durch $Zn + H_2SO_4$ kann AgBr zu Ag reduziert werden. Auch durch organische Reduktionsmittel läßt es sich leicht in Ag überführen. Ueber die Lichtempfindlichkeit des AgBr siehe unten „Photochemie“.

Die kristallisierten Ammoniakate $AgBr.NH_3$, $2AgBr.3NH_3$ und $AgBr.3NH_3$ können nicht aus der ammoniakalischen Lösung des AgBr gewonnen werden; man erhält die letztgenannte Verbindung aus flüssigem NH_3 und AgBr bei —30° und aus dieser durch Erwärmen bei bestimmten Temperaturen die beiden anderen; alle drei Ammoniakate haben erhebliche Dissoziationsdrucke.

AgJ Silberjodid (Jodsilber); entsteht durch Fällen von Ag˙-Ionenlösungen mittels J′-Ionen als hellgelber amorpher Niederschlag; Fp. 540°; d ca. 5,6. Kristallisiert kommt es in der Natur vor, d 5,61; aus dem Schmelzfluß scheidet sich eine sehr weiche reguläre Modifikation ab, die bei 146° in eine hexagonale Form übergeht; das amorphe AgJ wird durch Erwärmen zuerst plastisch, bei ca. 116° kristallinisch. AgJ ist in H_2O außerordentlich schwer löslich (s. unter 8); relativ leicht in HJ und KJ-Lösung; in NH_4OH löst es sich ganz wenig; auch in den anderen komplexbildenden Lösungen ist seine Löslichkeit meist gering.

Lösungsmittel	Konzentration	100 g der Lösung nehmen auf g AgJ	Temperatur
$Na_2S_2O_3$	1 : 100	0,03	20
$Na_2S_2O_3$	20 : 100	0,60	20
Na_2SO_3	10 : 100	0,01	20
KCN	5 : 100	8,23	25
NH_4CNS	5 : 100	0,02	20
NH_4CNS	10 : 100	0,08	20
Thiocarbamid	10 : 100	0,70	25
Thiosinamin	1 : 100	0,05	25
Thiosinamin	10 : 100	0,09	25

AgJ wird in der Hitze nur wenig durch H reduziert; im Cl-Strom wird es schon bei niederen Temperaturen schnell in AgCl übergeführt, geschmolzenes AgJ wird durch Br in AgBr verwandelt. Mit AgBr bildet AgJ homogene Mischungen, aber nicht in allen Verhältnissen; mit HgJ_2 bildet es Mischkristalle. Konzentrierte HNO_3 führt es beim Erhitzen unter J-Bildung in $AgNO_3$ über; analog wirkt H_2SO_4 bei 180°. Durch Zn und Fe wird AgJ unter verdünnten Säuren zu Ag reduziert; auch organische Reduktionsmittel können es in Ag überführen. Ueber die Lichtempfindlichkeit der AgJ siehe unten „Photochemie".

Aus Lösungen von AgJ in HJ scheidet sich $3AgJ.HJ.7H_2O$ aus in Form durchsichtiger Kristalle; aus KJ-Lösungen erhält man AgJ.KJ (weiß, asbestartig) und AgJ.2KJ (farblose Kristalle). Beim Erhitzen von AgJ mit NH_4OH im Einschlußrohr erhält man $AgJ.2NH_3$.

Ag_2O Silberoxyd; entsteht beim Fällen von Silbersalzlösungen mittels Alkali; fast schwarzes, sammetartiges, amorphes Pulver; d 7,143 bis 7,250; zersetzt sich bei 160° merklich, bei 250° lebhaft. An der Luft absorbiert es CO_2. Ag_2O löst sich merklich in Wasser unter Bildung des stark basischen AgOH; in NH_4OH bildet sich das Komplexion $Ag(NH_3)_2^{\cdot}$. In der organischen Chemie wird (frisch gefälltes oder unter Wasser aufbewahrtes) Ag_2O häufig verwendet, um Halogen durch OH zu ersetzen.

Höhere Oxyde, Ag_2O_2, Ag_2O_3 und Ag_3O_4, scheinen bei der Elektrolyse von Silbersalzlösungen bei ca. 0° an der Anode zu entstehen; es bildet sich daselbst ein metallglänzender kristallinischer Ueberzug, der aber auch noch Silbersalze enthält.

Ag_2S Silbersulfid (Schwefelsilber); entsteht durch Fällen von Silbersalzlösungen mittels H_2S; amorph, schwarz, es ist auch kristallinisch herstellbar; in der Natur kommt es kristallisiert als Argentit und Akanthit vor; bildet sich bei gewöhnlicher Temperatur aus den Bestandteilen; die Luft enthält (infolge von Reduktion der schwefligen Säure durch Ruß?) kleine Schwefelmengen, so daß Silbergegenstände sich oft mit einem sulfidischen Ueberzug bedecken. Ag wird auch durch H_2S und durch Schwefelleber (Polysulfide der Alkalien) in Ag_2S verwandelt. Durch HNO_3 und durch vorsichtiges Erhitzen an der Luft kann Ag_2S in Ag_2SO_4 übergeführt werden (Ag-Gewinnung aus Silberglanz). Mit H reagiert Ag_2S bei höherer Temperatur umkehrbar nach dem Schema $Ag_2S + H_2 \rightleftarrows 2Ag + H_2S$. Durch Hg wird Ag_2S, besonders leicht bei Gegenwart von NaCl-Lösung unter Bildung von Silberamalgam und HgS zersetzt (mexikanisches Amalgamationsverfahren zur Ag-Gewinnung). Ag_2S ist die am schwersten lösliche Silberverbindung; mit Ag bildet es durch Zusammenschmelzen homogene, Niello genannte Mischungen. Mit den Sulfiden vieler Metalle (K, Na, As, Sb, Bi usw.) bildet das Ag_2S „Sulfosalze", die zum Teil in der Natur vorkommen (s. oben „Vorkommen").

AgN_3 Silbernitrid, Silberazid; entsteht durch Einwirkung von Stickstoffwasserstoffsäure auf Silbernitratlösung; oder von Hydrazinsulfat auf Silbernitritlösung; weiße Nadeln, die durch Zerbrechen zur Explosion gebracht werden. Ag_3N oder $AgNH_2$ Berthellots Knallsilber, bildet sich durch Einwirkung von NH_4OH auf Ag_2O; kleine glänzende schwarze Kristalle, die beim Reiben explodieren. AgP und AgP_2 Silberphosphide, scheinen bei höheren Temperaturen aus den Komponenten zu entstehen.

Ag_2C_2 Silberacetylid, Silbercarbid; entsteht aus C_2H_2 und ammoniakalischer Silbernitratlösung; gelber, graustichiger Niederschlag, der am Licht schwarz wird und beim Erhitzen explodiert.

AgCN Silbercyanid, Cyansilber; entsteht durch Fällen von Silbersalzlösungen mittels CN'-Ionen, weißer, amorpher Niederschlag; in konzentriertem K_2CO_3 in der Hitze etwas löslich; scheidet sich daraus kristallinisch ab. Das gewöhnliche Cyansilber soll die Konstitution $Ag^{\cdot}(Ag(CN)_2)'$ haben; das Monomere soll sich bei der Zersetzung von $KAg(CN)_2$ durch H_2SO_4 bilden. Cyansilber löst sich in HCN und in den Cyaniden der Alkalimetalle u. a. unter Komplexbildung; HCl führt es in AgCl über. $KAg(CN)_2$ kristallisiert aus Lösungen von AgCN in KCN in Form von Oktaedern oder Tafeln.

AgCNO Silbercyanat; durch Fällen von $AgNO_3$ mittels KCNO; weiß; entzündet sich beim Erhitzen.

AgCNS Silberrhodanid (-sulfocyanat; Rhodansilber); entsteht beim Fällen von Silbersalzlösungen mittels CNS'-Ionen; weisser käsiger Niederschlag; löslich im Ueberschuß des Fällungsmittels unter Komplexbildung; es bildet mit AgBr eine unvollständige Mischungsreihe. Von Doppelverbindungen sind bekannt AgCNS.KCNS und $AgCNS.NH_4CNS$, die aus den entsprechenden Lösungen kristallisieren; ferner AgCNS.2KCNS, und AgCNS.3KCNS.

$AgClO_3$ Silberchlorat; entsteht durch Lösen von Ag_2O in Chlorsäure oder durch Einwirkung von Cl auf in Wasser suspendiertes Ag_2O; das Bromat sowie das Jodat lassen sich durch entsprechende Fällung erhalten. Sehr groß ist die Reihe der bekannten Perjodate.

Ag_2SO_3 Silbersulfit; entsteht durch Fällen von Silbersalzlösungen mittels SO_3''-Ionen; weiß, in H_2O wenig löslich; beim Kochen

mit Wasser zersetzt es sich nach der Gleichung $2Ag_2SO_3 = 2Ag + Ag_2SO_4 + SO_2$. — Ag_2SO_3 bildet Doppelsalze, z. B. das schwer lösliche $Ag_2SO_3 . Na_2SO_3 . 4H_2O$.

Ag_2SO_4 Silbersulfat; entsteht durch Auflösen von Silber in H_2SO_4; kleine weiße Kristalle; d 5,45; mäßig löslich in Wasser ($2{,}48 . 10^{-2}$ Mol/Liter bei 17°); etwas mehr in H_2SO_4; aus schwefelsaurer Lösung kristallisieren $Ag_2O . 2SO_3 . H_2O$ (= $AgHSO_4$); $2Ag_2O . 5SO_3 . 5H_2O$; $Ag_2O . 4SO_3 . 5H_2O$. Trockenes NH_3 bildet $Ag_2SO_4 . 2NH_3$; aus gesättigten Lösungen von Ag_2SO_4 in NH_4OH erhält man $Ag_2SO_4 . 4NH_3$ $(Ag2NH_3)_2^{\cdot\cdot}SO_4''$. Trockenes HCl führt geschmolzenes Ag_2SO_4 in AgCl über. Mit Ferrosulfat gibt Ag_2SO_4 ein Gleichgewicht, dessen Konstante $\frac{[Fe^{\cdot\cdot\cdot}]}{[Fe^{\cdot\cdot}]\,[Ag^{\cdot}]} = 126$ beträgt.

$Ag_2S_2O_3$ Silberthiosulfat; entsteht durch Fällen von Silbersalzlösungen mittels Thiosulfaten; weißes, süß schmeckendes Pulver; im Ueberschuß des Fällungsmittels unter Komplexbildung löslich; aus diesen Lösungen kristallisieren $Ag_2S_2O_3 . 2Na_2S_2O_3 . 2H_2O$, seideglänzende Blättchen, leicht in H_2O löslich; $Ag_2S_2O_3 . Na_2S_2O_3 . H_2O$ kleine sechsseitige Säulen; wenig in H_2O löslich (dieser Umstand ist für die photographische Praxis wichtig); $Ag_2S_2O_3 . 3K_2S_2O_3 . 2H_2O$; $3Ag_2S_2O_3 . 5K_2S_2O_3$; $Ag_2S_2O_3 . (NH_4)_2S_2O_3$.

Ag_2CrO_4 Silbermonochromat; aus $AgNO_3$ und K_2CrO_4; rotbraun.

$Ag_2Cr_2O_7$ Silberdichromat; aus $AgNO_3$ und konzentriertem $Na_2Cr_2O_7$ resp. CrO_3. Je nach den Konzentrationen von Silbersalz- und Dichromatlösung fallen reines Dichromat, ein Gemisch von Dichromat und Monochromat, oder reines Monochromat aus.

$AgNO_2$ Silbernitrit; entsteht durch Fällen von Silbersalzlösungen mittels NO_2'-Ionen; gelblicher Niederschlag; in wässeriger Lösung bildet sich ein meßbares Gleichgewicht $Ag^{\cdot} + 2NO_2' \rightleftarrows Ag + NO + NO_3'$ aus. In der Hitze zersetzt sich $AgNO_2$ in Ag und $AgNO_3$. Von Ammoniakaten sind bekannt $AgNO_2 . NH_3$, $AgNO_2 . 2NH_3$ und $AgNO_2 . 3NH_3$.

$AgNO_3$ Silbernitrat (Höllenstein); entsteht durch Auflösen von Ag in HNO_3 beim Erwärmen (unter Stickoxydbildung); etwa vorhandenes Cu wird durch Eindampfen und Schmelzen entfernt, wobei das $Cu(NO_3)_2$ in CuO übergeht; durch Auslaugen und Filtrieren erhält man reine $AgNO_3$-Lösung. farblose rhombische Kristalle, die bei 160° in eine polymorphe hexagonale Modifikation übergehen. d 4,33—4,36; Fp. 209°. In Wasser löst es sich leicht; von 100 g H_2O werden aufgenommen bei 0° 115 g, bei 20° 215 g, bei 90° 760 g $AgNO_3$; auch in Alkohol ist die Löslichkeit eine beträchtliche; 100 Teile Alkohol von 93 Volumprozent lösen bei 15° 3,8 Teile, 100 Teile Alkohol von 74 Volumprozent bei 15° 10,3 Teile $AgNO_3$. Die molare Leitfähigkeit Λ beträgt:

Mol/Liter	18°
0,001	115,5
0,001	114,0
0,01	108,7
0,1	94,7
1,0	67,8
7,0	30,2

$AgNO_3$ schmeckt metallisch bitter, wirkt stark ätzend und antiseptisch; durch organische Stoffe wird es (besonders im Licht) reduziert.

Auf glühender Kohle verpufft $AgNO_3$; Ozon fällt aus der Lösung von $AgNO_3$ ein blauschwarzes Peroxyd; P reduziert zu Ag (unter Bildung von Phosphorsäure). Beim Schütteln von Hg mit $AgNO_3$-Lösung entsteht (unter Ausbildung eines Gleichgewichtszustandes) eine kristallisierte Ag-Hg-Verbindung (arbor Dianae), Silberamalgam, und Quecksilbernitrat. Durch Lösen der Silberhaloide in heißer Salpetersäure erhält man die kristallisierten Verbindungen $AgNO_3 . AgCl$, $AgNO_3 . AgBr$, $AgNO_3 . AgJ$, $2AgNO_3 . AgJ$. Auf ähnlichem Wege entstehen das explosive $2AgNO_3 . AgCN$ und $2AgNO_3 . AgCNS$. Aus ammoniakalischer Lösung erhält man $AgNO_3 . 2NH_3$. Mit $LiNO_3$ und $NaNO_3$ ist $AgNO_3$ isomorph; mit KNO_3 und $TlNO_3$ bildet es Doppelsalze von der Form $AgNO_3 . MeNO_3$. — Mit Eiweißstoffen liefert es unlösliche Verbindungen (Anwendung in der Medizin).

Ag_2PO_3 Silberphosphit; weiß; zerfällt in der Hitze in Ag und $AgPO_3$.

Ag_3PO_4 Silberorthophosphat; entsteht durch Fällen von Silbersalzlösungen mittels PO_4'''-Ionen; hellgelb; in wässeriger H_3PO_4 löslich unter Bildung von Ag_2HPO_4.

$Ag_4P_2O_7$ Silberpyrophosphat; weißes Pulver.

$AgPO_3$ Silbermetaphosphat; existiert als Di-, Tri- und Hexametaphosphat entsprechend den verschiedenen Formen der Metaphosphorsäure; weiß.

Ag_3AsO_3 Silberarsenit; entsteht durch Mischen von $AgNO_3$-Lösung mit arseniger Säure und KOH; gelb; bekannt ist auch das Salz $2Ag_2O . As_2O_3$.

Ag_3AsO_4 Silberarsenat; entsteht durch Fällen von Silbersalzlösungen mittels AsO_4'''-Ionen; rotbraun; bekannt ist auch die Verbindung $Ag_2O . 2As_2O_5$.

Ag_2CO_3 Silbercarbonat; entsteht durch Fällen von Silbersalzlösungen mittels Kaliumkarbonat oder Kaliumhydrokarbonat; hellgelb; löslich in konzentriertem K_2CO_3; aus der Lösung erhält man $Ag_2CO_3 . K_2CO_3$. Die Dissoziationsspannung des $AgCO_3$ beträgt bei 132° 6 mm, bei 218° 752 mm.

$AgBO_2$ Silberborat; entsteht durch Versetzen von $AgNO_3$-Lösung mit Borax; weiß; wird von reinem H_2O unter Herstellung eines Gleichgewichtes hydrolytisch gespalten, wobei Silberoxyd und Borsäure gebildet werden.

$AgC_2H_3O_2$ Silberacetat; durch Auflösen von Ag_2CO_3 in heißer Essigsäure; glänzende Nadeln; ziemlich löslich in H_2O.

$Ag_2C_2O_4$ Silberoxalat; durch Fällen von Silbersalzlösungen mittels C_2O_4''-Ionen; weiß; verpufft bei 140°.

$Ag_2C_4H_4O_6$ Silbertartrat; durch Fällung von $AgNO_3$ mittels Seignettesalz; silberglänzende Schuppen; wird durch Wasser, besonders bei Anwesenheit von NH_4OH in der Hitze unter Ag-Abscheidung zersetzt.

10. Thermochemie. Die Bildungswärme der wichtigsten Silberverbindungen in g-cal sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt. (Reagierende Stoffe: Ag [metallisch], F, Cl, O [p für alle drei = 76 cm] Br [flüssig], J [fest], S [rhombisch]).

AgF = 23 700	Ag_2O = 6 ooo
AgCl = 29 300	Ag_2S = 3300
AgBr = 22 700	
AgJ = 14 000	

11. Photochemie. Bogenspektrum: starke Linien von 3281, 3383, 4055, 4212, 5209, 5466, 5472 Ångström-Einheiten. Das Silberion ist farblos.

Viele Silberverbindungen sind in hohem Grade l i c h t e m p f i n d l i c h und erleiden unter dem Einfluß längerer Bestrahlung eine Farbenänderung, die im allgemeinen auf Abscheidung von (eventuell kolloid gelöstem) metallischem Silber beruht. Bei kürzerer Einwirkung des Lichtes ist die photochemische Zersetzung nicht direkt sichtbar, sondern „latent"; sie kann aber durch die Einwirkung reduzierender Stoffe sichtbar gemacht, „entwickelt" werden. Darauf beruht die Verwendung der Silbersalze in der Photographie (s. diese). Sehr lichtempfindlich sind AgCl, AgBr, AgJ; Ag_2C_2, AgN_3. Weniger lichtempfindlich von den einfachen Verbindungen ist Ag_2O; ziemlich beständig Ag_2S und Ag_2F; unempfindlich AgF. Die Anwesenheit organischer oxydabler Stoffe begünstigt außerordentlich die photochemische Zersetzung der Silberverbindungen. Die besonderen Erscheinungen bei der Einwirkung des Lichtes auf Silbersalze sind im folgenden kurz beschrieben.

AgCl färbt sich im Licht anfangs violett, später braun, aber niemals, wenn es ganz rein ist, schwarz; die unter Chlorentwickelung verlaufende Zersetzung ist nur eine oberflächliche; beim Lösen in NH_4OH hinterbleibt feinverteiltes Ag. Intensiv durch Licht gefärbtes AgCl, sogenanntes „Photochlorid", stellt eine feste Lösung von Ag in AgCl, wahrscheinlich aber kein Gemisch von AgCl und Ag_2Cl (Silbersubchlorid) dar; HNO_3 kann nicht alles Ag aus der festen Lösung entfernen. Das Photochlorid zeigt das interessante Phänomen der „Farbenanpassung": auf Photochloridschichten, die z. B. durch Anlaufenlassen von Celloidinpapier erhalten werden können, lassen sich (vergängliche) Photographien in natürlichen Farben herstellen („Photochromie" von S e e b e c k, Z e n k e r, O. W i e n e r usw.). Ganz trockenes AgCl soll lichtunempfindlich sein. Die spektrale Empfindlichkeit für AgCl erstreckt sich im normalen Sonnenspektrum von ca. 400 $\mu\mu$ bis weit ins Ultraviolett hinein, mit einem Maximum von 380 bis etwa 320 $\mu\mu$ (dessen Breite ebenso wie die Ausdehnung des Empfindlichkeitsgebietes von der Durchlässigkeit der Atmosphäre und der Apparatur bedingt wird).

AgBr färbt sich im Licht unter Bromentwickelung blaßgrauviolett. Das Verhalten und die Konstitution dieses „Photobromids" sind denen des „Photochlorids" ganz analog. Die spektrale Empfindlichkeit des AgBr hängt stark von seiner Beschaffenheit (Dispersitätsgrad, Gehalt an fremden Stoffen usw.) ab; das aus wässeriger Lösung gefällte AgBr hat im normalen Sonnenspektrum ein Empfindlichkeitsmaximum bei 450 $\mu\mu$, während dieses bei dem aus alkoholischer Lösung gefällten AgBr bei 439 liegt.

AgJ färbt sich im Licht grünlichgrau, wenn die Fällung bei Ueberschuß von Silbersalz vorgenommen wurde; Jodabscheidung ist nicht nachzuweisen; war bei der Fällung das Jodid im Ueberschuß vorhanden, so ist keine Farbenänderung des AgJ im Licht wahrnehmbar; auf chemischem Wege ist aber auch in dieseem Falle die photochemische Veränderung nachweisbar. Durch „Entwickler" wird belichtetes AgJ viel schwerer reduziert, als AgBr und AgCl. AgJ auf Ag-Platten, durch Räuchern mit J-Dampf erhalten, wird im Licht „zerstäubt"; die dabei trüb gewordenen Stellen sind leicht abreibbar. Durch Hg-Dampf wird das auf jodierten Silberspiegeln erhaltene latente Bild „entwickelt" (D a g u e r r e o t y p i e). Das spektrale Empfindlichkeitsmaximum des AgJ liegt im Sonnenspektrum zwischen G und F; die Empfindlichkeit erstreckt sich bis gegen H; auch ist AgJ für sehr kurze Wellen (um $\lambda = 190$ $\mu\mu$) recht empfindlich.

Ueber die Anwendung der Silberhaloide in der Photographie vgl. den Artikel „P h o t o g r a p h i e".

Ag_2O ist besonders lichtempflindlich, wenn es durch Verdunsten einer ammoniakalischen, mit KOH versetzten Silbersalzlösung erhalten wurde; die violetten feinen Kriställchen werden im Licht sehr bald schwarz.

$AgNO_3$ ist an und für sich lichtbeständig;

bei Gegenwart organischer Substanzen scheidet es aber schnell Ag ab.

Ag_2CO_3 schwärzt sich im Licht.

Ag_3PO_4 ist sehr lichtempfindlich und wird als Zusatz zu Kopierpapieren verwendet, wenn weiche „Gradation" (vgl. den Artikel „Photographie") erzielt werden soll.

Ag_2CrO_4 ist lichtempfindlich und wird als Zusatz zu Kopierpapieren verwendet, wenn harte „Gradation" erzielt werden soll („Rembrandtpapier").

$AgC_2H_3O_2$ färbt sich im Licht gelblichgrau.

$Ag_2C_4H_4O_6$ (weinsaures Ag) ist sehr lichtempfindich und wird tief violettbraun gefärbt.

$Ag_2C_6H_6O_7$ (citronensaures Ag) ist sehr lichtempfindlich und wird braunrot gefärbt. Das weinsaure und das citronensaure Ag halten sich gut in Kopierpapieren (besser als $AgNO_3$) und dienen daher zur Bereitung von Auskopierpapieren.

Silberalbuminat ist sehr lichtempfindlich und färbt sich tiefbraun; es dient zur Herstellung der sogenanten Albuminpapiere.

Weiteres über die Lichtempfindlichkeit von Silberverbindungen siehe z. B. H. W. Vogel-E. König, Photochemie, Berlin 1906.

12. Kolloidchemie. Das Hydrosol des Silbers entsteht durch Reduktion von $AgNO_3$ mittels hydroxylhaltiger komplexer Ferroverbindungen, z. B. Kaliumferrocitrat (Carey Lea); auch Hydrazinhydrat und viele organische Stoffe vermögen (besonders alkalische) Silbersalzlösungen unter Bildung des Hydrosols zu reduzieren, wie Traubenzucker, Stärke, Dextrin, Formaldehyd, Pyrogallol, Tannin, Phenylhydrazinsulfat, Eiweiß, Gelatine, Agar-Agar usw. Die Farbe des Hydrosols ist in hohem Maße von dem Reduktionsmittel abhängig. Der bei Einwirkung von Ferrocitrat in konzentrierten Lösungen zuerst auftretende blaue Niederschlag löst sich zu einem dunkelroten Hydrosol, das durch Dialyse gereinigt werden kann. „Alkosole" können durch Dialyse in Alkohol gewonnen werden; aus diesen läßt sich ein sehr beständiges „Glycerosol" darstellen, (E. A. Schneider, A. Lottermoser). Durch Kathodenzerstäubung bei einem unter Leitfähigkeitswasser zwischen Ag-Drähten übergehenden Lichtbogen erhält man nach G. Bredig rotbraune bis olivengrüne Hydrosole; The Svedberg zerstäubt unter dem Lösungsmittel feinverteilte Ag-Folie zwischen Eisenelektroden durch die vielen, beim Stromdurchgang auftretenden Lichtbögen, oder granuliertes Ag durch den kondensierten Funken eines Induktoriums; auch durch „Zerstäubung" mittels ultravioletten Lichtes unter Wasser, Alkohol usw. hat der gleiche Forscher kolloide Ag-Lösungen hergestellt.

Gewisse anorganische Stoffe, wie Zinnsäure, Wasserglas usw. sowie zahlreiche organische Stoffe, zum Teil die genannten Reduktionsmittel, ferner protalbin- und lysalbinsaures Natrium (C. Paal) wirken als Schutzkolloide und gestatten weitgehend die Konzentrierung der Hydrosole und ihre Befreiung von Elektrolyten durch Dialyse.

Viele Salze, z. B. die Nitrate und Sulfate der Alkalimetalle und des Ammoniums, führen das flüssige Hydrosol in das feste (in Wasser sich wieder lösende) Hydrosol über (das in der Medizin Verwendung findet, [Argentum Credé, Collargol]); Schwermetallsalze erzeugen das (in Wasser unlösliche) Gel, das durch Alkali und gewisse Salze wieder in das lösliche Hydrosol übergeführt wird.

Die Ag-Hydrosole zeigen sehr deutlich das Tyndallphänomen; im Ultramikroskop erkennt man rote, gelbe, grüne und blaue Beugungsscheibchen, und zwar bei allen (sehr verschieden gefärbten) Hydrosolen. (Zsigmondy). Das Absorptionsmaximum liegt bei braunen Hydrosolen bei ca. 380 $\mu\mu$, bei grünen zwischen 400 bis 480 $\mu\mu$ (F. Ehrenhaft).

Das Ag-Hydrosol ist wie alle Metallsole negativ geladen; ein 6,8 mg Ag in 100 ccm enthaltendes Hydrosol ergab bei ultramikroskopischer Untersuchung 3.10 Teilchen in 1 ccm; daraus ergibt sich der Radius eines Teilchens zu $1{,}7 . 10^{-5}$ cm (d des Ag = 10,5) (E. F. Bourton).

Die Farbe der festen Hydrosole und Gele der Ag kann gelb, rot, violett oder grün sein; trotz des Metallglanzes haben sie keine metallischen Eigenschaften; aus ihnen hergestellte Spiegel auf Glas, Papier usw. leiten den Strom sehr schlecht (C. Barus und E. A. Schneider); Säuren u. a. verwandeln das Gel in gewöhnliches weißes oder graues Silber; dabei wird Wärme frei (A. Prange).

Belichtung führt gewisse feste Hydrosole in Gele über und scheint auch auf einzelne Gele etwas einzuwirken.

Die amorphen Silbersalze sind relativ leicht nach A. Lottermoser ohne Verwendung von Schutzkolloiden im kolloiden Zustand zu erhalten, und zwar durch Einwirkung z. B. der Halogene auf Silberhydrosol, oder durch Ionenreaktion in Lösungen geeigneter Konzentration; es existiert nämlich für jede Ionenreaktion des Ag eine Maximalkonzentration der reagierenden Lösungen, oberhalb deren an Stelle von Hydrosolbildung sofort das Gel sich abscheidet. Zur kolloiden Abscheidung ist es aber ferner nötig, daß eine der beiden reagierenden Ionenarten in einem bestimmten Ueberschuß zugegen ist; die elektrische Ladung dieser Ionengattung ist bestimmend für das Vorzeichen der Ladung des entstehenden Hydrosols. Nun sind positive

Hydrosole besonders empfindlich gegen mehrwertige Anionen, negative Hydrosole gegen mehrwertige Kationen; soll also das Ag·-Ion hydrosolbildend wirken (im Ueberschuß vorhanden sein), so muß man $AgNO_3$, nicht Ag_2SO_4 verwenden; soll dagegen z. B. das J′-Ion hydrosolbildend wirken, so muß man KJ, nicht etwa BaJ_2, CdJ_2 oder dgl. wählen. Positive Hydrosole sind dementsprechend bei den Reaktionen des Ag· mit S″, $HAsO_4''$, $Fe(CN)_6'''$ und $Fe(CN)_6''''$ nicht oder nur bei äußerst geringen Konzentrationen zu erhalten; dagegen sind die entsprechenden negativen (beim Ueberschuß des Anions entstehenden) Hydrosole leicht darzustellen.

Zu den dispersen Systemen des Ag gehören auch die durch Lichtwirkung aus den Haloiden entstehenden „Photohaloide" (auch unzutreffend „Subhaloide" genannt), die auch durch Einwirkung von Reduktionsmitteln auf AgCl, durch unvollständige Chlorierung von kolloidem Ag, durch Versetzen von Ag-Sol mit AgCl-Milch u. a. dargestellt werden können. Kristallisiert lassen sie sich erhalten, wenn man Silberhaloide aus Ammoniak oder aus Halogenwasserstoffsäure im zerstreuten Tageslicht oder bei Gegenwart von kolloidem Ag sich abscheiden läßt. Die Photohaloide stellen feste Lösungen zwischen Chlorsilber und amorphem Silber dar.

Literatur. ***E. Baur****, Silber und* ***A. Lottermoser****, Kolloidchemie des Silbers. In R. Abegg's Handbuch der anorganischen Chemie II 1, Leipzig 1908.* — ***W. Schlenk****, Silber und seine Verbindungen. In Gmelin-Kraut-Friedheim's Handbuch der anorganischen Chemie, Heidelberg 1908.* — ***Carey Lea*** *und* ***Lüppo-Cramer****, Kolloides Silber und die Photohaloide. Dresden 1908.*

K. Schaum.

h) Gold.

Aurum. Au. Atomgewicht 197,2.

1. Geschichte und Vorkommen. 2. Darstellung. 3. Formarten und allotrope Modifikationen. 4. Kolloidchemie. 5. Elektrochemie. 6. Spezielle Chemie.

1. Geschichte und Vorkommen. Das Gold war schon in prähistorischer Zeit bekannt und schon den Menschen dieser frühen Epochen muß es wegen seiner wesentlichsten Eigenschaft, der vollständigen Widerstandsfähigkeit gegen alle atmosphärischen Einflüsse, als besonders merkwürdig und wertvoll erschienen sein.[1])

[1]) In Mitteleuropa war das Gold in der älteren Bronzezeit, also gegen das Ende des 3. Jahrtausend v. Chr. nachgewiesenermaßen bekannt.

Der größte Teil des in den uns zugänglichen Schichten der festen Erdrinde vorkommenden Goldes ist gediegenes Gold. Wird solches auf primärer Lagerstätte gefunden, dann führt es den Namen Berggold. Es findet sich dann in der Regel auf Quarzgängen und zeigt deutliche Kristallformen (reguläre Würfel oder Oktaeder mit Rhombendodekaederflächen, seltener andere reguläre Formen); häufig sind indessen die Kristalle nur zu dünnen Lamellen und Blättchen ausgebildet. Größere Anhäufungen des Berggolds sind verhältnismäßig selten, meist befindet es sich im Zustand feiner Verteilung und wird in der Regel begleitet von Eisen-, Kupfer- und Arsenkies. Die das Seifen- oder Waschgold führenden Lagerstätten sind der Hauptsache nach alluviale Sande, welche den Abtragungsschutt ehemaliger oder noch bestehender Goldgänge führender Gebirgszüge darstellen. Es verdankt seine Anhäufung zu besonderen Lagerstätten einem in seiner Schwere begründeten natürlichen Aufbereitungsprozeß und ist immer begleitet von anderen schweren Mineralien, wie z. B. Chromeisenstein, Zinnstein, Zirkon usw. Seifengold findet sich häufig in größeren Stücken (Nuggets).

Alles gediegene Gold enthält neben geringen Mengen anderen Bestandteile, wie Kupfer, immer mehr oder minder große Mengen von Silber. Silberreiches Gold von etwa 40 % Silber an wird mit Elektrum bezeichnet. Umgekehrt führt alles gediegene Silber und Kupfer nachweisbare Mengen Gold.

Außer in gediegenem Zustand findet sich das Gold in einigen seltenen Erzen, sowie als nicht integrierender Bestandteil in vielen Sulfiden und Arseniden, in diesen jedoch nur in minimaler Menge. Als Erze, von denen das Gold ein integrierender Bestandteil ist, seien folgende aufgeführt: Sylvanit (Schrifterz) $AgAuTe_2$ (mit 24 bis 30 % Au), Nagyagit (10 bis 15 % Au), Tellurgold Au_2Te_2 (60 % Au). Für die Goldproduktion sind diese Erze unwesentlich. Größer sind die Mengen, die aus Kupferkiesen und aus gediegenem Kupfer bei der elektrolytischen Raffination gewonnen werden (etwa 2 % der gesamten Produktion).

2. Darstellung. Die Gewinnung des Goldes muß geteilt werden in zwei Gruppen von Prozessen: in 1. die Gewinnung von Rohgold und 2. die Darstellung von Feingold (Goldscheidung).

Die primitivsten Verfahren der Goldgewinnung sind die Waschprozesse. Bei diesen werden aus goldführenden Sanden durch methodisches Schlemmen allmählich die spezifisch leichteren Bestandteile weggespült. Man bedient sich dazu bei dem Handbetrieb flacher hölzerner Schalen, bei größerem Betrieb tieferer eiserner Pfannen

oder langer hölzerner bezw. auch gepflasterter Gerinne, welche mit Querrippen versehen sind und durch welche die goldführenden Sande durch raschströmendes Wasser getrieben werden. Soll das Verfahren auf goldführende Gesteine angewandt werden, so müssen sie erst in Steinbrechern bezw. Kollergängen entsprechend zerkleinert werden. Das feinst verteilte Gold geht bei diesen Prozessen verloren. Kiesiges Gold kann natürlich nach diesem Prozeß nicht verarbeitet werden.

Vielfach angewandt wird die Amalgamation des Goldes. Nach diesem Verfahren lassen sich auch kiesige Erze verarbeiten, wenn sie zuvor einem Röstprozeß unterworfen worden sind, der das Gold aus den Sulfiden in metallischer Form freimacht. Das zu verarbeitende Material, sei es Röstgut oder Berggold, wird naß mit Quecksilber in Pochwerken fein zerstampft. Das Quecksilber löst metallisches Gold leicht auf. Das gewonnene flüssige Amalgam wird durch Leder gepreßt und scheidet sich dabei in einen goldarmen Teil, der das Leder passiert und wieder in den Betrieb zurückgeht, und einen goldreicheren Teil, der das Leder nicht zu passieren vermag und in festem Zustand zurückbleibt. Aus diesem wird das Gold durch Abdestillieren des Quecksilbers gewonnen. Es gelingt mittels dieses Verfahrens nicht, das Gold vollständig zu extrahieren. Dasselbe erfährt daher heute durchweg eine Ergänzung durch das Chlor- oder das Cyanidlaugeverfahren.

Bei dem Chlorextraktionsverfahren (Plattnersches Verfahren) wird das Material zunächst wieder einem oxydierenden Röstprozeß unterworfen; gegen Schluß des Röstprozesses ersetzt man die Luft durch Chlor. Das Röstgut wird mit Wasser angerührt und erneut Chlor eingeleitet, eventuell unter Druck. Man läßt dann klar absitzen, läßt die überstehende Lösung ab, laugt erschöpfend aus und fällt aus ihr das Gold mit Ferrosulfat. Man kann die Lösung auch durch Holzkohle filtrieren, wobei sich das Gold metallisch in derselben niederschlägt und durch Verbrennen der Kohle in ziemlich reinem Zustand gewonnen wird.

Weit wichtiger als die oben aufgeführten Verfahren ist das Cyanidlaugeverfahren. Es beruht auf der Eigenschaft von Cyankaliumlösung, bei Gegenwart von Luft Gold ziemlich leicht aufzulösen nach der Gleichung:

I $4Au + 8CN' + 2H_2O + O_2 = 4\{Au(CN)_2\}' + 4OH$

Die Lösung wird also bei der Reaktion stark alkalisch. Die stöchiometrischen Verhältnisse sind durch obige Formel I streng gegeben, tatsächlich verläuft aber die Reaktion unter intermediärer Bildung von Wasserstoffsuperoxyd in den beiden Phasen II und III, deren Gesamtresultat I ist.

II $2Au + 4CN' + 2H_2O + O_2 = 2\{Au(CN)_2\}' + 2OH' + H_2O_2$

III $2Au + 4CN' + H_2O_2 = 2\{Au(CN)_2\}' + 2OH'$

Aus den so entstandenen Lösungen läßt sich das Gold quantitativ mit Zink niederschlagen: $2\{Au(CN)_2\}' + Zn = 2Au + \{Zn(CN)_4\}''$ oder man scheidet das Gold kathodisch durch Elektrolyse ab. In der Praxis wird das zu extrahierende Material zunächst mit einer schwachen Alkalilösung ausgelaugt, um einem Cyankaliverlust durch Metallsalze wie Ferrosulfat u. a. vorzubeugen. Da jedoch auch viele das Gold auf den Gängen begleitende Sulfide sich in starker Cyankalilösung auflösen und demzufolge bei Anwendung solcher Lösungen ein Cyankaliverlust eintreten würde laugt man mit sehr verdünnten Lösungen von zunächst etwa 0,35% und allmählich bis 0,08% sinkenden Cyankaligehalt und wäscht mit Wasser nach. Die Lauge fließt in Fällkasten, in denen sich das Gold in Form eines lockeren Pulvers auf Zinkspänen abscheidet. Elektrolytisch wird das Gold auf Kathoden von Bleifolie mit einer Stromdichte von ca. 0,5 Amp/qm in zusammenhängender Schicht niedergeschlagen. Da bei der Auflösung des Goldes durch Cyankali mit diesem zusammen auch Silber und eventuell Kupfer sowie die Sulfide mancher unedlerer Metalle in Lösung gehen und bei den Fällungsprozessen ganz oder teilweise wieder mit abgeschieden werden, so muß das Gold, das nach dem Cyanidprozeß erhalten wird, ebenso wie das nach den anderen Methoden gewonnene, der Raffination unterworfen werden. Bei der Ausfällung mit Zink wird das Gold nach dem Ablassen der Fällkästen zunächst von dem überschüssigen Zink möglichst abgespült und dann geröstet und geschmolzen, wobei der größte Teil des noch anhaftenden Zinnes durch Oxydation entfernt wird; bei elektrolytischer Abscheidung wird die Bleikathode abgetrieben.

Darstellung von Feingold (Scheidung). Die unedlen Metalle werden aus dem Rohgold bis auf ganz geringfügige Reste durch Abtreiben entfernt. Bei der Herstellung von Feingold handelt es sich also in der Hauptsache um die Scheidung von Gold und Silber. Außer Silber enthält das Rohgold nach der Treibarbeit noch wenige Prozent Kupfer und eventuell auch geringe Mengen von Platinmetallen. Die nachstehend aufgeführten Methoden beziehen sich in erster Linie auf die Scheidung des Goldes vom Silber.

Die beiden ältesten Verfahren zur Gold-Silberscheidung beruhen auf der Erfahrung, daß aus einer Gold-Silber-Legierung, die nicht mehr als 3 Teile Silber auf 1 Teil Gold enthält, durch konzentrierte Salpetersäure bezw. Schwefelsäure nur das Silber, nicht das Gold aufgelöst wird. Wird die Auflösung

mit Salpetersäure bewirkt, so heißt das Verfahren: Scheidung durch die Quart (Quartation), wird sie durch Schwefelsäure bewirkt: Affination. In beiden Fällen bringt man in der Praxis die Legierung meistens auf das Verhältnis 1 Teil Gold: $2\frac{1}{2}$ Teilen Silber und granuliert um eine möglichst große Oberfläche zu erzielen. Bei der Quartation wird dann die Legierung in Porzellan- oder Steingutgefäßen mit Salpetersäure ausgekocht. Das Silber geht in Lösung und wird auf Silbernitrat verarbeitet. Das Kupfer geht mit dem Silber in Lösung. Bei der Affination kocht man die Legierung in gußeisernen Kesseln mit konzentrierter Schwefelsäure aus. Silber, Kupfer, Blei, Zinn u. a. Metalle werden in die Sulfate verwandelt. Man spült dieselben mit Wasser von dem Gold ab und wiederholt den Prozeß. Es wird so ein Gold erhalten, das nur noch unbedeutende Mengen von Silber enthält. Die Platinmetalle verbleiben, wenn vorhanden, bei dem Gold. Das Silber kann aus der schwefelsauren Lösung mit Kupfer ausgefällt werden.

Sehr reines Feingold von 999,8 bis 999,9 $^0/_{00}$ Feingehalt erhält man durch elektrolytische Raffination. In einer Lösung von mit Salzsäure versetztem Goldchlorid, die 30 bis 40 g Gold im Liter enthält und auf 60 bis 70° gehalten wird, löst man das Rohmetall elektrolytisch als Anode auf und schlägt an Kathoden von reinem Goldblech bei Stromdichten von etwa 1500 bis 3000 Amp/qm reines Gold nieder. Mit Ausnahme von Osmium und Iridium, von denen es auf diesem Wege sehr vollkommen getrennt wird, lösen sich die Begleitmetalle des Goldes mit diesem auf, ohne aber an der Kathode wieder mit niedergeschlagen zu werden. Insbesondere geht auch vorhandenes Platin quantitativ mit in Lösung.

Außer nach der elektrolytischen Methode kann das Gold auch durch Schmelzen mit Salpeter von den Platinmetallen befreit werden; Platin und Iridium gehen dabei in die Schlacken. Ferner kann man das Rohgold in Königswasser auflösen, wobei das Silber als unlösliches Chlorsilber hinterbleibt. Hierbei geht Platin vollständig, Iridium teilweise mit in Lösung; aus dieser fällt man dann das Gold durch vorsichtigen Zusatz von Eisenvitriol. Auch auf trockenem Wege kann Silber von Gold geschieden werden, indem man in geschmolzenes Rohgold, über dem sich zum Schutze gegen Verspritzen eine Decke von geschmolzenem Borax befindet, Chlor einleitet. Das Silber verwandelt sich vollkommen in Chlorsilber und steigt an die Oberfläche, während das Gold, da bei der Schmelztemperatur die Dissoziationsspannung des Goldchlorids weit mehr als eine Atmosphäre beträgt, zum größten Teil unangegriffen bleibt. Nur kleine Mengen gehen als Goldchlorid in das Chlorsilber über. Wenn die Chloration beendigt ist, läßt man erkalten und gießt nach dem Erstarren des Goldes das noch flüssige Chlorsilber ab. Das Verfahren eignet sich zur Verarbeitung von Gold, das reich an Silber, aber arm an anderen Verunreinigungen ist.

Das reinste Feingold des Handels enthält als Verunreinigungen nur noch Spuren von Silber und von Kupfer, von denen es sich durch Auflösen in verdünntem Königswasser, Verdünnen und Absitzenlassen dieser Lösung, und darauf folgende Reduktion mit Oxalsäure befreien läßt.

3. Formarten und allotrope Modifikationen. Wird das Gold aus konzentrierteren Lösungen durch Reduktionsmittel als Metall niedergeschlagen, so bildet es stets metallglänzende reguläre Kristalle (beobachtet sind die Formen 0, $\infty 0 \infty$, 303, 202, ∞ 02; irrtümlich sind auch hexagonale Formen beschrieben worden), die manchmal (wie z. B. bei der Reduktion mit Oxalsäure) eine zusammenhängende blechartige Haut bilden. Aus verdünnten Lösungen kann das Gold bei der Reduktion mit sehr verschiedenem Dispersitätsgrad ausfallen, womit auch natürlich sein Aussehen eine kontinuierliche Aenderung erfährt. Im allgemeinen bildet das aus mäßig verdünnten Lösungen niedergeschlagene Gold ein feines, schweres, purpurrotes bis braunes Pulver, das sich leicht absetzt. Es liegen indessen hier keinesfalls allotrope Modifikationen vor, wie sich durch Potentialmessung einzelner Niederschläge gegeneinander mit Sicherheit hat fetsstellen lassen, sondern, wie schon betont, lediglich Unterschiede des Dispersitätsgrades ein und derselben Modifikation des Goldes, der regulären. Aus sehr stark verdünnten Lösungen fällen die meisten Reduktionsmittel, namentlich solche, die keine starken Elektrolyte bilden, wie z. B. fast alle organischen, das Gold nicht in kompakter Form aus, sondern es entstehen kolloidale Goldlösungen. Diese können ganz verschiedene Färbungen besitzen in allen Nuancen von schwach rosa, intensiv violett bis blau. Es wird weiter unten noch näher auf sie eingegangen werden.

Das Gold schmilzt in Kohlensäureatmosphäre bei 1063,5°. Sauerstoff erniedrigt den Schmelzpunkt etwas, weshalb in Luft keine sicheren Werte erhalten werden. Beim Schmelzen findet eine beträchtliche Ausdehnung statt. Die Schmelzwärme ist 16,3 g-cal. für 1 g.

Das Gold ist viel weniger flüchtig als Silber, Kupfer, Zinn usw. Bei ca. 1375° destillieren erst Spuren. Im elektrischen Ofen ist es leicht flüchtig. Der Siedepunkt wird

auf ca. 2500° geschätzt. Die spezifische Wärme ist 0,0318 zwischen 37 und 127°.

Das spezifische Gewicht des Goldes ist sehr von seiner Herstellungsart abhängig. Für geschmolzenes Gold beträgt es ca. 19,3. Auch die Festigkeitseigenschaften des Goldes variieren sehr nach seiner Vorbehandlung. Die Zugfestigkeit für umgeschmolzenes Gold ist 1445 kg/qcm. Für hartgezogene Drähte 2035—3315 kg/qcm Der Elastizitätsmodul des gezogenen Goldes bei 15° ist 8131 kg/qmm, für angelassenes Gold aber nur noch 5585 kg/qmm. Merkwürdigerweise scheint bei 100° ein Minimum der Festigkeit und der Elastizität zu liegen. Die Festigkeit des Goldes wird durch geringe Beimengungen außerordentlich stark beeinflußt; Silber, Kupfer, Cadmium und andere Metalle mit geringem Atomvolumen erhöhen die Festigkeit bei Zusatz von 0,2 %. Kalium, Wismut, Selen wie überhaupt Elemente mit hohem Atomvolumen erniedrigen sie. Auch die Dehnbarkeit und die Geschmeidigkeit werden in der gleichen Weise beeinflußt. Das Gold ist das dehnbarste aller Metalle. Es läßt sich zu Blättchen von 9.10^{-5} mm Dicke ausschlagen und 1 ccm Gold kann in einen Draht von 3,2 km Länge ausgezogen werden. Der lineare Ausdehnungskoeffizient zwischen 0 und 100° ist 1470.10^{-8}. Die Schallgeschwindigkeit in Gold ist kleiner als in den meisten der übrigen Metalle: 2112,2 m/sec. in gezogenem und 1741,3 m/sec. in geglühtem Gold. Die Wärmeleitfähigkeit bei 18° ist 69,4 bezogen auf Silber = 100 oder in absolutem Wert 2,93 Wattsekunden. Die elektrische Leitfähigkeit von Gold, bezogen auf Silber = 100, ist 67,4. Der spezifische Widerstand in Ohm/ccm ist $21{,}97.10^{-7}$. Für gezogenes hartes Gold sind die Werte etwas höher. Dünn ausgeschlagenes Gold ist je nach der Schichtdicke mit grünlich-blauer bis rein grüner Farbe durchscheinend. Die Brechungsexponenten sind Rot 0,31, B 0,38, E 0,53, F 1,00, G u. H 1,02. Gold ist diamagnetisch, seine Suszeptibilität beträgt —3,07.

4. **Kolloidchemie.** Durch Reduktion des Goldes aus sehr verdünnten Lösungen sowie durch elektrische Zerstäubung unter Flüssigkeit kann es im kolloidalen Zustand erhalten werden, wie schon erwähnt wurde. Das kolloidale Gold ist in den mannigfachsten Varietäten als Hydrosol und außerdem auch als Organosol in Methyl-, Aethyl-, Isobutylalkohol bekannt.

Dem kolloidalen Gold sind auch das Goldrubinglas und der Cassiussche Goldpurpur zuzurechnen.

Die Hydrosole des Goldes lassen sich sehr leicht erhalten, wenn verdünnte Goldchlorwasserstofflösungen (vorteilhaft von der Konzentration 1:1000 Wasser) passend reduziert werden. Als günstig wirkende Reduktionsmittel kommen in Frage: ätherische oder alkoholische Phosphorlösung; weniger gut wirkt gelber Phosphor selbst, da er verhältnismäßig unbeständige Sole bildet. Ferner Formaldehyd in Verbindung mit geringen Mengen Kaliumbicarbonat; desgleichen Hydroxylamin oder Hydrazin bezw. Phenylhydrazinchlorhydrat mit wenig sehr stark verdünntem Alkali. Ein großer Ueberschuß des Reduktionsmittels ist tunlichst zu vermeiden. Hat man für alle Operationen sehr reines (elektrolytfreies) Wasser angewandt und entfernt man die zur Reduktion zugesetzten bezw. bei derselben gebildeten Elektrolyte durch Dialyse, so erhält man Sole von beinahe unbegrenzter Haltbarkeit. Durch Elektrolyte wird das Gold aus den kolloidalen Lösungen in Form von schwarzen, braunen und rotbraunen pulverigen Niederschlägen gefällt.

Die schwarzen Niederschläge stellen im allgemeinen reversibles Goldgel dar, das sich in reinem Wasser mit blauer Farbe wieder löst, während die braun gefärbten Niederschläge irreversibles Gel darstellen. Vom metallischen Gold unterscheiden sich die Goldgele dadurch, daß sie von Quecksilber nicht amalgamiert werden. Indessen ist beim Quecksilberextraktionsverfahren vielfach die Erfahrung gemacht worden, daß auch sehr fein verteiltes metallisches Gold sich der Amalgamierung leicht entzieht. Es existieren hier also zweifellos Uebergänge, und die fragliche Erscheinung beruht jedenfalls nur auf einer Oberflächenwirkung, nicht auf wirklich chemischer Verschiedenheit. Uebrigens scheidet sich das Gold manchmal aus kolloidalen Lösungen bei langem Stehen direkt in Form von metallglänzenden Spiegeln ab, wie auch die reversiblen Gele beim längeren Stehen metallisch werden.

Da das Gold aus seinen kolloidalen Lösungen durch Elektrolyte als Gel ausgefällt wird, ist es leicht verständlich, daß stark dissoziierende Reduktionsmittel wie $FeSO_4$, $C_2O_4H_2$ usw. im Ueberschuß angewandt nur vorübergehend das Sol bilden und beinahe momentan das irreversible Gel oder Metall absetzen.

Zur Darstellung von Goldsolen durch elektrische Zerstäubung läßt man zwischen Elektroden aus dickem Golddraht unter Wasser, das zweckmäßig mit einer Spur Alkali versetzt ist, einen Lichtbogen mit 30 bis 40 Volt Spannung und 8 bis 10 Amp. übergehen. Die Kathode liefert unter Zerstäubung einen feinen Nebel, der sich in dem Wasser verteilt und ein sehr beständiges Sol liefert. Aehnlich kann man auch die Alkoholsole erhalten.

Die kolloidalen Goldlösungen enthalten das Gold in festem Zustand, aber in äußerst

feiner Verteilung. Je nach dem Dispersitätsgrad, den das Gold in ihnen aufweist, ist ihre Inhomogenität mehr oder weniger leicht erkennbar. Die feinsten kolloidalen Goldlösungen, aus Chloridlösungen, die 1.10^{-4}—$0,5.10^{-4}$ Au enthielten, besitzen nach dem Formaldehydverfahren dargestellt, eine hochrote Farbe und sind auch im Ultramikroskop homogen. Aus konzentrierteren Lösungen hergestellt, zeigen sich die Sole im auffallenden Licht trübe, das seitlich reflektierte Licht ist polarisiert. Im Ultramikroskop verrät sich dann die Anwesenheit fester Teilchen durch Beugungsscheibchen, aus deren Dimensionen sich die mittlere lineare Größe der Teilchen für eine rote Lösung zu etwa $2.10^{-2}\,\mu$ ergibt. Das Gewicht solcher Partikelchen würde ungefähr 4.10^{-15} betragen. Bei noch höheren Konzentrationen der Ausgangslösungen (>1 $AuCl_4H$ auf 500 Wasser) erhält man kolloidale Lösungen, die im auffallenden Licht nahezu undurchsichtig, im durchfallenden Licht aber noch vollkommen klar sind. Solche Sole tragen schon deutlichen Suspensionscharakter, setzen nach mehrwöchentlichem Stehen spontan ab und besitzen meist eine unansehnliche schmutzig blaue Färbung. Indessen ist ein genauer Zusammenhang zwischen Teilchengröße und Färbung der kolloidalen Lösung nicht zu konstatieren. Man kann blaue und rote Lösungen mit derselben Teilchengröße herstellen.

Im elektrischen Potentialgefälle wandert das Gold der Goldsole nach der Anode und setzt sich an ihr als schwarzes Pulver ab, das beim Eintrocknen metallisch wird. Das Gold ist also in Sol negativ geladen und wird demzufolge von positiven Hydrosolen, wie Titansäure, Zinnsäure, Zirkonerde usw. ausgeflockt.

Aus dieser Beobachtung ergibt sich die Natur des Cassiusschen Goldpurpurs, den man erhält, indem man eine verdünnte Goldchloridlösung mit $SnCl_4$ enthaltende Lösung von Zinnchlorür reduziert. Das Gold wird zunächst zu negativ geladenem Sol reduziert, ausgefällt und dann sofort durch das infolge Hydrolyse nach Gleichung $SnCl_4 + 4H_2O = Sn(OH)_4 + 4HCl$ in dem Lösungsgemisch vorhandene positive Zinnhydrosol neutralisiert und gefällt. Der aus der Adsorptionsverbindung von Gold und Zinnhydrogel bestehende Niederschlag zeigt die purpurrote Farbe des kolloidalen Goldes und führt seit altersher den Namen Cassiusscher Goldpurpur. Das Zinndioxyd wird von Glasflüssen leicht aufgelöst. Dabei verteilt sich das Gold des Goldpurpurs äußerst fein im Glase und das so entstehende Goldrubinglas ist als eine kolloidale Lösung von Gold im Glasfluß anzusehen. Es wird das dadurch bewiesen, daß auch die klarsten Goldrubingläser im Ultramikroskop sich als optisch inhomogen erweisen. Die lineare Teilchengröße des in ihnen enthaltenen Goldes ist ca. 5 $\mu\mu$.

Zur technischen Darstellung des Goldpurpurs erwärmt man 10 Teile Pinksalz ($SnCl_6(NH_4)_2$) mit 1,07 Teilen Stanniol und 40 Teilen Wasser bis zur Lösung des Zinns, setzt dann noch 140 Teile Wasser zu und gießt die Lösung langsam in eine mit 480 Teilen Wasser verdünnte gelinde erwärmte Lösung von 1,34 Teilen Gold in möglichst wenig Säure.

5. Elektrochemie. Das Gold steht seinem Atomgewicht entsprechend im periodischen System der Elemente als Homologes von Kupfer und Silber in der Nebenreihe der ersten Gruppe. Danach wäre zu erwarten, daß das Gold hauptsächlich einwertige Verbindungen bilde. Dem ist nicht der Fall. Es sind wohl Verbindungen des einwertigen Goldes bekannt, aber die stabile Oxydationsstufe ist die dreiwertige. Dagegen paßt der Wert für das Atomvolumen mit 10,2 gut in die Kurve der Atomvolumina nach L. Meyer.

Von allen Elementen besitzt das Gold die geringste Elektroaffinität. Es gelingt auf keine Weise metallisches Gold in Oxyd überzuführen. Nur durch die stärksten Oxydationsmittel wie Chlor und die chlorbildenden Reaktionsgemische wie Salpetersäure + Salzsäure, Bleisuperoxyd + Salzsäure usw. wie auch von Selensäure wird es gelöst. Spurenweise in Lösung gebracht, wird es durch Erwärmen mit Gemischen von konzentrierter Schwefelsäure und Permanganat, Bleisuperoxyd, Arsensäure, Salpetersäure u. a. Angegriffen wird es merkwürdigerweise auch durch Pyrosulfurylchlorid $S_2O_5Cl_2$. Anodisch wird das Gold in Alkalilösungen und konzentrierten Säuren gelöst; in besonders reichlicher Menge bei der Elektrolyse von Chloridlösungen. Das Gold ist nicht imstande, den Wasserstoffionen die positive Ladung zu entziehen; auch dann nicht in meßbarem Grade, wenn durch Komplexbildung die Konzentration der zunächst entstehenden Goldionen auf einem Minimum gehalten wird wie im Fall der Einwirkung von Cyankaliumlösung.

Infolge ihrer geringen Elektroaffinität sind die einfachen Ionen des Goldes $Au^{\cdot}$ und $Au^{\cdot\cdot\cdot}$ in den Goldlösungen verhältnismäßig selten, sie bilden vielmehr mit den meisten Anionen sehr beständige Komplexe. Von den beiden Ionen ist stabil nur das Auriion $Au^{\cdot\cdot\cdot}$. Das Auroion $Au^{\cdot}$ geht spontan in das Auriion über, während nach der Gleichung $3Au^{\cdot} = Au^{\cdot\cdot\cdot} + 2Au$ zwei Drittel des Goldes als Metall abgeschieden werden. Es sind deshalb nur die hochkomplexen Auroverbindungen wie $\{Au(CN)_2\}K$ u. a., die keine

meßbaren Mengen Auroion enthalten, in wässeriger Lösung stabil.

6. Spezielle Chemie. Goldchlorür AuCl wird als gelblichweißes Pulver erhalten, indem man wasserfreies Goldchlorid $AuCl_3$ auf 180 bis 200° erhitzt. Nach der Gleichung $AuCl_3 = AuCl + Cl_2$ spaltet sich aus dem Goldchlorid ein Molekül Chlorgas ab. Bei Gegenwart von Wasser bildet das Goldchlorür schnell Chlorid nach der Gleichung $3Au^{\cdot} = Au^{\cdot\cdot\cdot} + 2Au$, und zwar um so rascher, je höher die Temperatur ist. Die Reaktion geht schon an feuchter Luft vor sich. In Alkalichloridlösungen löst es sich zunächst auf, um aber gleichfalls bald Gold abzuscheiden unter Bildung von Verbindungen des dreiwertigen Goldes. Bei höherer Temperatur dissoziiert das Chlorür in Gold und Chlor.

Goldbromür AuBr erhält man aus Goldbromwasserstoffsäure $AuBr_4H$, indem man durch vorsichtiges Erhitzen erst den Bromwasserstoff abtreibt und dann bei 115° das entstandene Tribromid spaltet. Die gelblichgraue, salzartige Substanz ist äußerst instabil; bei Temperaturen wenig über 115° zerfällt sie in Gold und Brom, mit Wasser reagiert sie analog dem Chlorid. In Alkohol, Aether, Aceton usw. ist sie löslich, scheidet aber nach kurzer Zeit auch aus diesen Lösungen Metall ab unter Bildung von Verbindungen des dreiwertigen Goldes.

Goldjodür AuJ bildet sich aus Goldchloridlösung und Jodkalium nach der Gleichung $AuCl_4H + 3KJ = AuJ + 3KCl + HCl + J_2$. Es entsteht auch bei Einwirkung einer ätherischen Jodlösung auf Gold bei 50° oder bei der doppelten Umsetzung von Goldchlorür mit Jodkalium. Es bildet ein zitronengelbes Pulver, das wegen seiner geringeren Löslichkeit gegen Wasser und solche Lösungen, die seine Löslichkeit nicht erhöhen, ziemlich beständiger ist als das Chlorür und Bromür. Der Dissoziationsdruck des Jodes aus dem Goldjodür beträgt bei 25° 95% desjenigen des reinen Jodes; es vermag deshalb gelegentlich so zu reagieren wie freies Jod. So lösen organische Lösungsmittel für Jod, wie Alkohol, Aether usw. dieses heraus und scheiden Gold ab; mit Kalilauge bildet es unter Goldabscheidung Jodid und Jodat. Mit Jodkalium bildet es leicht ziemlich beständige Lösungen.

Goldcyanür AuCN bildet sich aus dem Kaliumgoldcyanür durch Erhitzen mit Salzsäure auf 50° nach der Gleichung $\{Au(CN)_2\}K + HCl = KCl + AuCN + HCN$. Auch entsteht es bei der Einwirkung von Cyanwasserstoffsäure auf Goldoxyd. Gelbe mikroskopische hexagonale Tafeln.

Das Cyanür ist in Wasser weniger löslich als das Jodid; darum sind auch verdünnte Säuren, Schwefelwasserstoff u. A. ohne Einwirkung auf dasselbe. Dagegen lösen Schwefelammonium, Ammoniak, Kalilauge, Thiosulfatlösungen es unter Bildung komplexer Anionen auf. Das Goldcyanür dissoziiert viel schwerer als das Jodür, es zersetzt sich erst beim Erhitzen.

Kaliumgoldcyanür $\{Au(CN)_2\}K$ entsteht durch Auflösen von Goldcyanür in Cyankalium und Kristallisation. Seine Löslichkeit in kaltem Wasser beträgt etwa 144, in kochendem Wasser 1000 Teile im Liter. In Alkohol ist es wenig, in Aether nicht löslich. Es bildet sich auch bei der Auflösung von Gold in Cyankalium bei Gegenwart von Luft, sowie bei der anodischen Auflösung von Gold in Cyankaliumlösung. In ähnlicher Weise bilden sich das Natrium- und Ammoniumsalz der Aurocyanwasserstoffsäure $Na\{Au(CN)_2\}$ und $NH_4\{Au(CN)_2\}$. Die freie Säure zerfällt sofort in Goldcyanür und Cyanwasserstoff, wenn man versucht, sie durch Einwirken von Salzsäure usw. herzustellen.

Kaliumgoldrhodanür $\{Au(SCN)_2\}K$ entsteht aus Goldchloridlösung und Rhodankaliumlösung bei 80°; strohgelbe abgestumpfte Prismen.

Goldoxydul Au_2O bildet sich mit Gold verunreinigt, wenn man Aurochlorid mit Kalilauge zersetzt nach der Gleichung $2AuCl + 2KOH = Au_2O + 2KCl + H_2O$. Rein erhält man es, indem man eine Goldbromkaliumlösung unter Eiskühlung vorsichtig mit schwefliger Säure zu Bromür reduziert. Ein Ueberschuß derselben ist zu vermeiden und dann sofort Kalilauge zuzufügen. Es entsteht zunächst das Hydroxydul als in feuchtem Zustand dunkelviolettes, im trockenen Zustand hellgrauviolettes Pulver. Beim Erhitzen verliert es zunächst Wasser und geht in das Oxyd über; bei Temperaturen über 200° beginnt die Dissoziation in Sauerstoff und Gold. Das feuchte frisch gefällte Goldoxydul geht in reinem kaltem Wasser mit indigoblauer Farbe kolloidal in Lösung und wird beim Kochen wieder ausgefällt. Die Lösung fluoresziert in auffallendem Licht bräunlich und besitzt ein charakteristisches Absorptionsspektrum im grünen Teil. In Aetzalkalien und in Säuren löst sich das Goldhydroxydul in feuchtem Zustand auf, um alsbald Goldmetall abzuscheiden, unter Bildung von Verbindungen des dreiwertigen Goldes.

Goldsulfür Au_2S entsteht aus einer Kaliumgoldcyanürlösung durch Sättigen mit Schwefelwasserstoff und darauffolgendem Zusatz von Salzsäure. Es bildet ein im feuchten Zustande stahlgraues, im trockenen ein braunschwarzes Pulver. Verdünnte Säuren sind ohne Einwirkung darauf.

Das frischgefällte Goldsulfür bildet mit reinem Wasser leicht kolloidale Lösungen; man erhält daher nach der Reaktion $2AuCl_3 + 3H_2S = Au_2S + 6HCl + 2S$ aus neutraler

Goldchloridlösung mit Schwefelwasserstoff eine klare Flüssigkeit, die erst auf Zusatz von viel Salzsäure das Goldsulfür fallen läßt. Kochende Goldchloridlösung wird durch Schwefelwasserstoff bis zum Metall reduziert. In Schwefelalkalien löst sich das Goldsulfür zu einer orangefarbigen Flüssigkeit auf, die die Salze der Thioaurosäure enthält, z. B. NaAuS und KAuS. Wird in solche Lösungen unter Erwärmen Luft eingeleitet, so scheidet sich elementares Gold ab; Ansäuern gibt einen Niederschlag von Aurosulfid.

Mit Ammoniakflüssigkeit gibt das Goldoxydul eine sehr explosive Verbindung, wahrscheinlich der Zusammensetzung $Au_3N.NH_3.4H_2O$. Einfache Salze, in denen das einwertige Gold als Kation $Au^{\cdot}$ enthalten ist, sind in wässeriger Lösung nicht existenzfähig, da sie wegen der äußerst geringen Basizität des Au_2O vollständige Hydrolyse erleiden würden. Dagegen kennt man einige solche Salze des einwertigen Goldes, in denen es als Bestandteil eines komplexen Anions auftritt, und die sehr beständige wässerige Lösungen bilden. Die bestbekannte Verbindungsreihe dieser Art ist die Aurothioschwefelsäure $\{Au_2(S_2O_3)_4.H_2O\}H_6$ und ihre Salze. Das Natriumsalz $\{Au_2(S_2O_3)_4.H_2O\}Na_6$ fällt aus einer mit Natriumthiosulfat versetzten Goldchloridlösung auf Zusatz von Alkohol. Die freie Säure erhält man aus dem Baryumsalz mittels Schwefelsäure. Die Lösung der Aurothioschwefelsäure und ihrer Salze werden durch die gewöhnlichen Reduktionsmittel wie Ferrosalze, Zinnchlorür, Oxalsäure nicht verändert.

Weniger gut bekannt sind die Derivate des komplexen Anions, die einwertiges Gold mit schwefeliger Säure bildet. Das Natriumsalz entsteht, wenn Goldchloridlösung mit alkalischer Natriumsulfitlauge in der Wärme versetzt wird. Es hat die Formel $\{Au_2(S_2O_3)_4.3H_2O\}Na_6$. In den Lösungen dieser Salze läßt sich weder die schweflige Säure noch das Gold in der üblichen Weise analytisch erkennen.

Zweiwertiges Gold. Einige Erscheinungen deuten darauf hin, daß Goldverbindungen existieren, die sich scheinbar von einem Oxyd AuO ableiten. Die bis jetzt über den Gegenstand vorliegenden Untersuchungen sind aber wenig sicher, vor allem ist kein Beweis dafür erbracht, daß nicht Kombinationen von Salzen des dreiwertigen mit solchen des einwertigen Goldes vorliegen, wie sie ja bei dem analogen Thallium gut bekannt sind. Das relativ am besten bekannte der fraglichen Salze ist das Goldmonosulfat $AuSO_4$. Man erhält es durch vorsichtiges Eindampfen einer Lösung von Goldtrioxyd in konzentrierter Schwefelsäure bei ca. 250° in Form von großen scharlachroten Prismen. Mit kochendem Wasser bildet es ein tiefschwarzes Pulver von der Formel $Au_3O_2(OH)_2$. Ueber das Oxyd AuO liegen nur sehr vage Angaben vor. Die Halogenide $AuBr_2$ und $AuCl_2$ sollen sich bilden bei der Einwirkung von Brom bezw. Chlor auf Goldpulver bei ca. 170°. Dafür daß nicht mechanische Gemische von Gold bezw. Goldmonochlorid mit dem Trichlorid vorliegen, sprechen die thermischen Daten, welche bei der Zersetzung der beiden Körper durch verdünnte Salzsäure gefunden werden; es liegen hier indessen wahrscheinlich Auriaurochlorid oder Auriaurobromid vor analog den Thalli-Thallohalogeniden.

Die Verbindungen des dreiwertigen Goldes sind im allgemeinen stabil. Das $Au^{\cdots}$ ist ein äußerst schwaches, positives Ion, welches seine Ladung an Metalle bezw. an solche Kationen, die imstande sind noch weitere positive Elektronen aufzunehmen, leicht abgibt. Sie werden infolge dessen durch $Fe^{\cdot\cdot}$, $Sn^{\cdot\cdot}$, $Hg_2^{\cdot\cdot}$, $Cu^{\cdot}$ unter Ausfällung des Metalles glatt entladen. Die hierauf beruhenden Reaktionen werden in Analyse und Technik vielfach angewandt. Auch durch NO_2', S_2O_4'', SO_3'' usw. wird das $Au^{\cdots}$ leicht in das elementare Gold übergeführt.

Mit OH′ bildet das $Au^{\cdots}$ ein schwerlösliches Hydroxyd, das sich indessen im Ueberschuß des Fällungsmittels als komplexes Auration leicht löst. Andere schwerlösliche Salze des $Au^{\cdots}$ sind nicht bekannt. Es besitzt im übrigen starke Tendenz zur Komplexbildung.

Goldchlorid, $AuCl_3$, entsteht durch vorsichtiges Erhitzen von Blattgold im Chlorstrom. Da es sehr leicht bei erhöhter Temperatur in Goldchlorür und Chlor zerfällt, ist es nötig, bei der Herstellung ständig für eine Chloratmosphäre zu sorgen. Der Dissoziationsdruck $AuCl_3 = AuCl + Cl_2$ beträgt bei 251° 1 Atm. Bei dieser Temperatur beginnt das Goldchlorid sich zu verflüchtigen. Der Schmelzpunkt des trockenen Goldchlorids in einer Chloratmosphäre liegt bei 287 bis 288°. In Wasser ist Goldchlorid leicht löslich. Aus der Lösung kristallisiert ein Hydrat $AuCl_3.2H_2O$. In der wässerigen Lösung ist Goldchlorid wahrscheinlich als Oxytrichlorato-Aurisäure $\{Au{}^{Cl_3}_{O}\}H_2$ enthalten. Das Silbersalz dieser Säure von der Formel $\{Au{}^{Cl_3}_{O}\}Ag_2$ erhält man beim Neutralisieren der Lösung mit Silbercarbonat als schwerlösliches gelbes Pulver.

Goldchlorwasserstoffsäure $\{AuCl_4\}H$. Versetzt man die dunkelgelb gefärbte Lösung von Goldtrichlorid mit Salzsäure, so schlägt die Farbe in hellgelb um, und in der entstandenen Lösung ist das Gold als $AuCl_4H$ enthalten. Die gleiche Lösung bildet sich beim Auflösen von Gold in Königswasser oder anderen Chlor entwickelnden Flüssig-

keiten. Goldchlorwasserstoffsäure kristallisiert aus der wässerigen Lösung mit 3 oder 4 Mol. Wasser in langen Nadeln. Sie bildet eine Reihe gut charakterisierter Salze mit Alkalien und Erdalkalien, z. B. $AuCl_4K \cdot \frac{1}{2}H_2O$, $AuCl_4Na \cdot 2H_2O$, $AuCl_4Li \cdot 4H_2O$, $AuCl_4Rb$, $(AuCl_4)_2Ca \cdot 6H_2O$, $(AuCl_4)_2Zn \cdot 12H_2O$; welche in Wasser ausnahmslos leicht löslich und meist auch in Alkohol löslich sind.

Goldbromid $AuBr_3$. Nimmt man Golddibromid (s. o.) mit wasserfreiem Aether auf, filtriert und läßt die konzentrierte ätherische lösung verdunsten, so erhält man festes Goldtribromid in festem Zustand als dunkelbraunes Pulver. Es ist viel unbeständiger als Goldchlorid und geht schon bei 160° vollständig in Goldbromür über. In Wasser ist es mit tief scharlachroter Farbe leicht löslich. Bromwasserstoff führt die wässerige Lösung in die Goldbromwasserstoffsäure $\{AuBr_4\}H$ über, welche der Goldchlorwasserstoffsäure analog ist. Auch sie bildet mit Alkalien gut kristallisierte, purpurrote Salze z. B. $AuBr_4K$.

Goldjodid, AuJ_3, läßt sich wegen seiner niedrigenDissoziationstemperatur nicht direkt aus den Elementen erhalten. Es entsteht dabei stets das Jodür. Man kann es vorübergehend darstellen, indem eine neutrale Goldchloridlösung vorsichtig in wässeriger Jodkaliumlösung gegossen wird. Es entsteht dabei zunächst goldjodwasserstoffsaures Kalium AuJ_4K, das sich bei weiterem Zusatz von Goldchlorid nach der Formel $3AuJ'_4 + Au^{\cdot\cdot\cdot} = 4AuJ_3$ umsetzt. Es bildet ein dunkelgrünes, schwerlösliches Pulver, das schon beim Trocknen in Goldjodür übergeht.

Goldhydroxyd, $Au(OH)_3$, bildet sich beim Versetzen von Goldchloridlösung mit Natriumkarbonat oder mit anderen Hydroxyl liefernden Reagentien. Der Niederschlag besitzt ockerbraune Farbe und ist immer durch Aurate verunreinigt, die schwer zu entfernen sind. In Kalilauge usw. löst es sich leicht auf. Bei Erhitzen auf ca. 150° geht es in Aurioxyd Au_2O_3 über, das schon bei wenig höherer Temperatur etwa 160° Sauerstoff verliert.

Goldtrisulfid Au_2S_3. Bei der Einwirkung von H_2S auf wässerige Goldchloridlösung tritt stets Reduktion ein. Man kann indessen das Trisulfid erhalten, indem man bei —10° goldchlorwasserstoffsaures Lithium mit H_2S zur Reaktion bringt, wobei Salzsäure entweicht. Nach dem Extrahieren des Chlorlithiums mit absolutem Alkohol hinterbleibt Goldtrisulfid als amorphes schwarzes Pulver, welches sich bei 200° vollständig in Gold und Schwefel zersetzt. Wasser spaltet momentan Schwefelwasserstoff ab.

Aurisulfat. Bei Gegenwart von Oxydationsmitteln löst sich Gold in konzentrierter Schwefelsäure zu einer gelben Flüssigkeit auf. Aus der Lösung fällt beim Verdünnen mit Wasser Goldhydroxyd bezw. Gold. In festem Zustand ist das Goldsulfat nicht bekannt. Ein Kaliumsalz von der Formel $Au(SO_4)_2K$ erhält man beim Eindampfen der schwefelsauren Lösung mit Kaliumsulfat.

Aurisalpetersäure $Au(NO_3)_4H$, bildet sich beim Auflsöen von Aurihydroxyd in starker Salpetersäure. Die Säure selbst ist wenig bekannt, gut charakterisiert sind dagegen einige Alkalisalze $Au(NO_3)_4K$, $Au(NO_3)_4Rb$, $Au(NO_3)Tl$.

Goldstickstoff (Knallgold): Bei der Einwirkung von Ammoniak oder Ammonkarbonat auf Goldchloridlösung oder Hydroxyd erhält man schmutzig grün- bis braungelbe Pulver, die beim Reiben, Stoßen oder Erhitzen lebhaft verpuffen unter Bildung von Gold, Stickstoff und Ammoniak. Das aus dem Oxyd erhaltene Knallgold besitzt die Formel $Au\langle^{NH}_{NH_2}$, ist also ein Auriamidimid, während dem aus dem Goldchlorid hergestellte die Formel eines Goldimidchlorids $Au\langle^{NH}_{Cl}$ zukommt.

Goldcyanide: Aus einer Lösung, die man durch vorsichtiges Versetzen von Kaliumcyanidlösung mit Goldchlorid erhält, kristallisiert in farblosen Tafeln das Kaliumsalz der Auricyanwasserstoffsäure mit der Formel $\{Au(CN)_4\}K_2 3H_2O$, das erst bei 200° sein Wasser, zugleich aber auch einen Teil des Cyans unter Bildung von Kaliumgoldcyanür abgibt. Aehnlich bilden sich die analogen Salze mit den übrigen Alkalien. Werden derartige Lösungen mit Kieselfluorwasserstoffsäure versetzt, so erhält man unter Abscheidung von Kieselfluorkalium Lösungen von Auricyanid, das sich beim Verdunsten über Schwefelsäure in festem Zustand mit der Formel $Au(CN)_3 \cdot 3H_2O$ in Form großer farbloser Kristallblätter abscheiden läßt. Beim Erwärmen mit Wasser zersetzt es sich.

Literatur. ***Naumann-Zirkel,*** *Mineralogie, Leipzig 1901.* — ***Schnabel,*** *Metallhüttenkunde, Berlin 1903.* — ***Dammer,*** *Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. III, IV, Stuttgart 1902.* — ***Abegg,*** *Handbuch der anorganischen Chemie, Bd. II, 1, Leipzig 1908.*

O. Hauser.

Lithographische Steine.

In der Lithographie verwendete sehr feinkörnige, meist aus der Juraformation stammende, reine, gewöhnlich gelb gefärbte Kalksteine (siehe den Artikel „Karbonatgesteine").

Lithophysen.

Steinblasen sind blasige oftmals gekammerte durch Entweichen von Gasen in Eruptivgesteinen entstandene Hohlräume (vgl. den Artikel „Gesteinsstruktur").

Lithosphäre.

Im Gegensatz zur Atmosphäre (Lufthülle) und Hydrosphäre (Wasserhülle) der Erde ihr Bestand an festen Gesteinen (vgl. den Artikel „Chemischer Bestand der Erde").

Lommel

Eugen von.

Geboren am 19. März 1837 in Edenkoben in der Pfalz; gestorben am 19. Juni 1899 in München. Er studierte 1854 bis 1858 Mathematik und Physik im München, war 1860 bis 1865 Lehrer an der Kantonschule in Schwyz, 1865 bis 1867 am Gymnasium in Zürich und Privatdozent am dortigen Polytechnikum und an der Universität, 1867 bis 1868 Professor der Physik an der landwirtschaftlichen Hochschule, 1868 bis 1886 in Erlangen, von da an der Universität München. Er war Mitglied der Münchener Akademie der Wissenschaften. Die Optik, Fluoreszenz und Phosphoreszenz verdankt ihm wesentliche Förderung.

Literatur. ***Boltzmann**, E. v. Lommel. Jahresbericht der Deutschen Mathematikervereinigung VIII, Heft I. — Nekrolog von **Graetz** in der Beilage zur Allgemeinen Zeitung Juni 1899.*

E. Drude.

Lomonossow

W. W.

1711 als Sohn eines russischen Bauern geboren, starb nach einem wechselvollen Leben als Professor der Chemie in Petersburg 1765. Die Arbeiten dieses merkwürdigen Mannes im Gebiete der Chemie und Physik sind lange Zeit unbeachtet geblieben, da sie wenig verbreitet, z. T. nicht veröffentlicht, aber auch ihrer Zeit vorauseilend, nicht verstanden wurden. In Rußland selbst stand Lomonossow durch seine dichterischen, historischen und philologischen Schriften im höchsten Ansehen. Auf seine chemischen und physikalischen Untersuchungen hat erst B. N. Menschutkin (in Ostwalds Annalen der Naturphilosophie Bd. 4, 203 1904) aufmerksam gemacht. Eine Auswahl seiner wichtigsten chemisch-physikalischen Arbeiten hat er mit M. Speter in Ostwalds Klassikern Nr. 178 (1910) veröffentlicht. Aus diesen in die Zeit 1741 bis 1752 fallenden Abhandlungen erkennt man den hohen Flug seines Geistes, der den Lehrsatz von der Erhaltung des Stoffes, die Grundgedanken der atomistischen Lehre und besonders wichtige Beziehungen zwischen physikalischen und chemischen Eigenschaften der Stoffe erfaßt hatte. Manche seiner Erörterungen, z. B. über die Wärme, muten ganz modern an und enthalten deutlich den Keim der heutigen Energetik. Lomonossow ist mit Recht als ein ausgezeichneter Vertreter der Physikochemie bezeichnet worden, die erst in den letzten 30 Jahren zu großer Bedeutung gelangt ist.

E. von Meyer.

Loschmidt

Josef.

Geboren am 15. März 1821 zu Putschirn bei Karlsbad, gestorben am 8. Juli 1895 in Wien, war der Sohn armer Landleute. Durch Vermittelung des Lehrers kam er auf das Prager Gymnasium, studierte in Prag und Wien, wo er von dem Studium der Philosophie und Mathematik zu dem der Physik und Chemie überging. Er wirkte von 1868 bis 1891 als Professor der Physik an der Wiener Universität; 1867 ernannte ihn die Wiener Akademie der Wissenschaften zum korrespondierenden und später zum wirklichen Mitglied. Er berechnete als erster die Anzahl der in einem ccm enthaltenen Luftmoleküle (Loschmidtsche Zahl),

Literatur. ***L. Boltzmann**, Zur Erinnerung an Joseph Loschmidt. Physik. Zeitschrift I 1900. — Populare Schriften von **L. Boltzmann** S. 228, Leipzig 1905.*

E. Drude.

Lossen

Karl August.

Er wurde am 5. Januar 1841 zu Kreuznach geboren. Er wandte sich dem Studium des Bergfachs zu, verbrachte seine praktischen Vorbereitungsjahre in Müsen und Saarbrücken, studierte dann in Berlin und Halle. 1866 wurde er Hilfsgeologe, 1873 Landesgeologe in Berlin. Seine Hauptarbeit bestand in der Untersuchung und Kartierung des Harzes, wo er von 1866 bis 1892 fast ununterbrochen jedes Jahr längere Zeit tätig war. Das Resultat seiner Arbeit ist die geologische Uebersichtskarte des Harzes im Maßstab 1 : 100 000. Neben zahlreichen Abhandlungen und Berichten, in denen er seine Anschauung über Tektonik, Gliederung und Verbreitung der verschiedenen Formationen im Harz darlegt, sind vor allem wichtig die petrographischen Arbeiten, in denen er als einer der ersten die große Bedeutung der Dynamometamorphose hervorhebt. Er starb am 24. Februar 1893.

Literatur. ***Berendt**, Karl August Lossen. Jahrb. d. k. preuß. geol. Landesanst., Berlin 1894, Bd. XIV, S. LXVII. — **E. Kayser**, Karl Lossen. N. J. f. Min. usw. 1893 II.*

O. Marschall.

Lösspuppen.

Auch Lößkindl genannt, sind aus kohlensaurem Kalk und tonigen Bestandteilen gebildete Konkretionen von puppenähnlicher, oft verzweigter und verästelter Gestalt, welche im Löß vorkommen und dort durch Auslaugungsvorgänge entstehen (siehe den Artikel „Atmosphäre“).

Lösungen.

1. Definition des Begriffs einer Lösung. Kristalloide und kolloidale Lösungen. 2. Zusammensetzung, Konzentration. Aequimolekare und äquivalente Lösungen. 3. Löslichkeit. Begrenzte und unbegrenzte Löslichkeit. Gesättigte, übersättigte und ungesättigte Lösungen. 4. Lösungsdruck. Analogie zur Verdampfung. Elektrolytischer Lösungsdruck. 5. Lösungen von Gasen: a) In Gasen. Partialdruckgesetz von Dalton. b) In Flüssigkeiten. Absorptionsgesetz von Henry. c) In festen Körpern. 6. Lösungen von Flüssigkeiten: a) In Gasen. b) In Flüssigkeiten: α) Begrenzt mischbare Flüssigkeiten. Kritischer Lösungspunkt. Destillation. β) Unbegrenzt mischbare Flüssigkeiten. Dampfdruck. Thermodynamik. Destillation. Sonstige Eigenschaften. c) In festen Körpern. 7. Lösungen von festen Körpern: a) In Gasen. b) In Flüssigkeiten: α) Allgemeines. Osmotischer Druck. Isotonische Lösungen. Dampfspannung. Siedepunkt. Molekulare Siedepunktserhöhung. Gefrierpunkt. Molekulare Gefrierpunktserniedrigung. Eutektischer Punkt. Kryohydrate. Solvate. Nernstsches Verteilungsgesetz. Lösungswärme, β) Elektrolytlösungen. Osmotischer Druck. Leitfähigkeit. Ostwaldsches Verdünnungsgesetz. Dissoziationskonstante. Dissoziierende Kraft der Lösungsmittel. Beziehungen zur Dielektrizitätskonstante. Neutrale, saure, basische Lösungen. Isohydrische Lösungen Additive Eigenschaften, Löslichkeitsprodukt. Löslichkeitsbeeinflussung. Lösungen von Doppelsalzen. c) In festen Körpern. Feste Lösungen. Isomorphie.

1. Definition des Begriffs einer Lösung. Kristalloide und kolloidale Lösungen. Eine Lösung ist ein homogenes Gemenge chemisch verschiedener Stoffe. Sie unterscheidet sich von einer chemischen Verbindung dadurch, daß ihre Bestandteile nicht in einem konstanten einfachen stöchiometrischen Gewichtsverhältnisse zueinander stehen, das von äußeren Bedingungen und Art der Darstellung in gewissen Grenzen unabhängig ist. Auf der anderen Seite unterscheidet sich eine Lösung von einem rein mechanischen Gemenge durch ihre Homogenität, d. h. durch die Gleichartigkeit ihrer Zusammensetzung bis in die kleinsten Teilchen, die erst bei molekularen Dimensionen aufhört. Wir stellen uns daher die molekulare Konstitution einer Lösung so vor, daß überall die einzelnen Moleküle der verschiedenen Komponenten nebeneinander liegen, ohne sich jedoch gegenseitig in einem bestimmten stöchiometrischen Verhältnisse festzuhalten, wie die Atome im Molekül einer chemischen Verbindung. Es läßt sich aber nicht verkennen, daß es fast unmöglich ist, eine scharfe Grenze nach beiden Seiten hin zu ziehen, wie sich auch in der Natur eine fast lückenlose Reihe von Zwischenstufen vorfindet. So ist es z. B. sehr wahrscheinlich, daß die bei der Auflösung eines Stoffes wirksamen Kräfte chemischer Natur sind, und ebenso, daß in vielen Fällen die Molekeln des gelösten Stoffes mit denen des Lösungsmittels Verbindungen, sog. Molekularverbindungen, eingehen. Als sicherstes Merkmal zur Entscheidung, ob in einem bestimmten Falle eine Lösung oder eine einheitliche chemische Verbindung vorliegt, muß man das von Ostwald auf Grund der Phasenregel (vgl. den Artikel „Phasenlehre“) aufgestellte Kriterium ansehen: Wenn ein Körper in einem endlichen Temperatur- und Druckgebiet die Phase ändert, z. B. verdampft oder schmilzt, ohne seine Zusammensetzung zu ändern, so liegt eine chemische Verbindung vor; anderenfalls hat man es mit einer Lösung zu tun. Für die Unterscheidung einer Lösung von einem mechanischen Gemenge kommt hauptsächlich folgender Gesichtspunkt in Betracht. Während es bei einem mechanischen Gemenge möglich ist, die Komponenten durch rein mechanische Methoden (Auslesen, Schlämmen usw.) ohne besonderen Arbeitsaufwand zu trennen, ist dies bei einer Lösung nicht der Fall. Es steht hiermit im engsten Zusammenhang, daß Stoffe, die eine Lösung bilden können, dies von selbst tun, d. h. sich mischen, wenn man sie miteinander in Berührung bringt. Sie diffundieren dann ineinander und sind erst im Gleichgewicht, wenn eine homogene Lösung entstanden ist, was unter Umständen allerdings sehr lange dauern kann, falls man den Vorgang nicht durch Rühren, Schütteln usw. beschleunigt. Jedoch ist der Unterschied zwischen einer Lösung und einem mechanischen Gemenge überhaupt nicht scharf zu fassen, und es gibt eine Klasse von Lösungen, die kolloidalen Lösungen, die einen stetigen Uebergang von den gewöhnlichen Lösungen, die man auch wahre Lösungen oder kristalloide Lösungen nennt, zu den mechanischen Suspensionen bilden.

Die in kolloidalem Zustande gelösten Stoffe, die Kolloide, zeichnen sich u. a. durch eine sehr langsame Diffusion und abnorm kleinen osmotischen Druck sowie dadurch aus, daß sie im Gegensatz zu den Kristalloiden nicht durch Pergament oder tierische Membran hindurchzudiffundieren vermögen. Diese Eigenschaften erklären sich daraus, daß die gelösten Stoffe sich im kolloidalen Zustande zu großen Molekülkomplexen zu-

sammenballen, und man sieht leicht, daß mit zunehmender Größe dieser Molekülkonglomerate die kolloidalen Lösungen sich immer mehr den Suspensionen nähern. Für eine ausführliche Beschreibung der Kolloidlösungen sei auf den Artikel „Disperse Gebilde" verwiesen, während im folgenden nur die wahren Lösungen besprochen werden sollen. Es sei noch hervorgehoben, daß der hier gegebene Begriff der Lösungen nicht nur die flüssigen Lösungen, an die man hierbei gewöhnlich denkt, sondern auch Gasgemische und feste Lösungen, z. B. Metalllegierungen umfaßt.

2. Zusammensetzung, Konzentration, Aequimolekulare und äquivalente Lösungen. Eine Lösung wird charakterisiert durch die chemische Natur der sie zusammensetzenden Stoffe und das Verhältnis, in dem diese in ihr enthalten sind. Die Zusammensetzung kann auf sehr verschiedene Weise definiert werden, von denen die gebräuchlichsten kurz erwähnt seien. Gibt man an, wieviel Gramm eines jeden Stoffes in 100 g Lösung enthalten sind, so bestimmt man die Zusammensetzung nach Gewichtsprozenten. Oft wählt man als Mengeneinheit nicht das Gramm sondern das Mol, d. h. das Molekulargewicht eines Stoffes in Gramm (z. B. ein Mol $H_2O = 18$ g), weil man vielfach Gesetzmäßigkeiten hierdurch einfacher darstellen kann. Man dividiert dann die Prozentzahl eines jedes Stoffes durch sein Molekulargewicht und addiert die so erhaltenen Zahlen. Mit dem Faktor, mit dem man die Summe multiplizieren muß, um 100 zu erhalten, multipliziert man die einzelnen Zahlen, so daß man die in 100 Molen Lösung enthaltene Anzahl Mole der einzelnen Stoffe angibt. So erhält man die Zusammensetzung in Molprozenten, und in Molbrüchen, wenn man die in ein Mol Lösung enthaltenen Bruchteile von Molen der einzelnen Stoffe angibt. Verändern die Stoffe beim Mischen ihr Volumen nicht, so kann man auch mit Volumprozenten rechnen. Für wissenschaftliche Zwecke am brauchbarsten ist die Angabe der Konzentration. Diese wird gemessen durch die Anzahl Gramme (Gewichtskonzentration) oder Mole (Molkonzentration, Normalität) des betreffenden Stoffes, die in der Volumeinheit (ein l, eventuell 1 ccm) der Lösung enthalten sind. Als Gewichtskonzentration bezeichnet man auch nach Raoult manchmal, besonders bei verdünnten Lösungen, die Anzahl Gramme gelösten Stoffes, die auf 100 g Lösungsmittel kommen. Mitunter, besonders in der Maßanalyse, rechnet man mit Aequivalentkonzentration, indem man nicht die Anzahl Mole, sondern chemischer Aequivalente eines bestimmten Bestandteils pro l zählt. Bei Säuren oder Basen zählt man z. B. die wirksamen H- oder OH-Gruppen, so daß eine äquivalentnormale Schwefelsäure nur ½ normal an Molen ist, da sie eine zweibasische Säure ist. Lösungen von gleicher Konzentration an Molen oder Aequivalenten nennt man äquimolekulare oder äquivalente Lösungen.

3. Löslichkeit. Begrenzte und unbegrenzte Löslichkeit. Gesättigte, übersättigte und ungesättigte Lösungen. Es ist nun, wie man weiß, durchaus nicht möglich, aus beliebigen Stoffen Gemische von beliebiger Zusammensetzung herzustellen. Es sind vielmehr in dieser Hinsicht folgende Fälle zu unterscheiden.

1. Es ist ein Stoff in einem anderen überhaupt nicht löslich, z. B. Gold in Benzol. Es ist jedoch möglich, daß in einem solchen Falle die Löslichkeit nur ganz unmeßbar klein ist, so daß sie durch keinerlei uns zu Gebote stehenden Mittel nachgewiesen werden kann. Man hat guten Grund, anzunehmen, daß dies wirklich so ist, und daß jeder Stoff in jedem anderen, wenn auch nur ganz spurenweise, löslich ist. Somit fällt dieser Fall eigentlich mit dem nächsten zusammen.

2. Es ist ein Stoff in einem anderen begrenzt löslich, z. B. Kochsalz in Wasser. Setze ich zu einem bestimmten Quantum Wasser von Zimmertemperatur nacheinander kleine Mengen Kochsalz hinzu, so werden diese zuerst aufgelöst, schließlich aber wird ein Punkt erreicht, bei dem auch bei weiterem Zusatz von Salz die Zusammensetzung der Lösung sich nicht mehr ändert; sie ist an Salz gesättigt. Dieser Punkt hängt von äußeren Umständen wie Temperatur und Druck ab, z. B. nimmt die Löslichkeit fester Stoffe in den meisten Fällen mit steigender Temperatur zu. Sättigt man nun Wasser bei höherer Temperatur mit Kochsalz, so daß man eine stärker konzentrierte Lösung erhält, und kühlt diese dann auf Zimmertemperatur ab, so kristallisiert so lange Kochsalz aus, bis die der Zimmertemperatur entsprechende Sättigungskonzentration erreicht ist. Allerdings ist es unter Umständen möglich, durch sehr vorsichtiges Abkühlen, Vermeiden jeder Erschütterung usw. das Ausfallen von Salz hintanzuhalten und auf diese Weise eine L. von höherer als der Sättigungskonzentration, eine übersättigte Lösung herzustellen. Jedoch ist diese unbeständig, und in allen Fällen wird die Übersättigung durch die geringste Spur hinzugefügten festen Salzes aufgehoben. Ist also ein Stoff in einem Lösungsmittel begrenzt löslich, so steht die Lösung nur bei einer für jede Temperatur bestimmten Konzentration in Gleichgewicht mit dem zu lösenden Stoff. Ist die Konzentration kleiner, so ist die Lösung ungesättigt und es wird Stoff aufgelöst.

Ist die Konzentration größer, so ist die Lösung übersättigt und es fällt Bodenkörper aus.

3. Endlich kann eine Substanz in einer anderen unbegrenzt löslich sein, d. h. es gibt keine Konzentration der Lösung, die mit der reinen Substanz im Gleichgewicht wäre, sondern es bildet sich unter allen Umständen eine einheitliche Mischung. Welcher von diesen Fällen im einzelnen eintritt, wird weiter unten besprochen werden. Im allgemeinen sind im gasförmigen Zustande alle Körper unbegrenzt mischbar, im flüssigen ein Teil nur bregenzt oder unmerklich mischbar, in festem Zustande nur sehr wenige unbegrenzt, die meisten unmerklich mischbar.

4. Lösungsdruck. Analogie zur Verdampfung Elektrolytischer Lösungsdruck. Die Auflösung eines festen Körpers in einer Flüssigkeit kann in vielen Beziehungen der Verdampfung einer Flüssigkeit verglichen werden. Sowie bei dieser zu jeder Temperatur ein bestimmter Druck, oder wie man auch sagen kann, eine bestimmte Konzentration des gesättigten Dampfes gehört und die Flüssigkeit in einen gegebenen Raum so lange verdampft, bis er mit Dampf von dieser Konzentration erfüllt ist, so gehört auch zu einem festen Stoff in Berührung mit einer Flüssigkeit eine Lösung bestimmter Konzentration und in einem gegebenen Volumen Flüssigkeit schreitet die Auflösung so lange fort, bis diese Konzentration erreicht ist. In beiden Fällen kann man gesättigte, ungesättigte und übersättigte Lösungen und Dämpfe unterscheiden, die ein ganz analoges Verhalten zeigen. Demnach stellt man sich die beiden Vorgänge unter ganz entsprechenden molekularen Bildern vor. Man nimmt bekanntlich in der kinetischen Molekulartheorie an, daß die Molekeln eines Körpers Geschwindigkeiten besitzen, deren Mittelwert nur von dem Molekulargewicht und der Temperatur abhängt, die aber für die einzelnen Moleküle verschieden und ganz zufällig sind. Den Vorgang der Verdampfung veranschaulicht man sich nun in folgender Art. Man nimmt an, daß die Flüssigkeitsmoleküle aufeinander eine starke Anziehung ausüben, deren Wirkung nur von den Molekeln, deren Geschwindigkeit einen bestimmten Wert überschreitet, überwunden werden kann, so daß diese dann aus der Oberfläche der Flüssigkeit herausfahren, d. h. verdampfen. Dadurch wird der Raum über der Flüssigkeit mit immer mehr Molekeln in Dampfform erfüllt, von denen ihrerseits wieder eine Anzahl in die Flüssigkeitsoberfläche eindringen, d. h. sich kondensieren. Gleichgewicht wird erst erreicht, wenn infolge von Verdampfung die Dampfdichte so hoch gestiegen ist, daß die Zahl der aus der Oberfläche herausfahrenden Moleküle gleich der in sie eindringenden ist. Ebenso stellt man sich das Gleichgewicht zwischen einem festen Stoffe und seiner gesättigten Lösung derart vor, daß sich ständig Moleküle von der Oberfläche des Körpers losreißen und sich ebensoviel auf ihr aus der Lösung niederschlagen. Demgemäß schreibt man dem sich lösenden Stoffe einen gewissen Druck zu, mit dem er in Lösung geht, den sogenannten L ö s u n g s d r u c k (oder Lösungstension), den man nur mit den gewöhnlichen Mitteln nicht messen kann, da er nur innerhalb der Lösung existiert und sich nicht nach außen hin bemerkbar macht. Allerdings muß betont werden, daß die Bedeutung dieser Darstellung sich bei dem heutigen Stande der Molekulartheorie darauf beschränkt, uns ein anschauliches, aber immerhin hypothetisches Bild von dem Vorgange der Auflösung zu liefern. Dagegen werden wir später mit Hilfe des osmotischen Druckes (im Abschnitt 7 b α, s. a. den Artikel „O s m o t i s c h e T h e o r i e") eine vollständig exakte und hypothesenfreie Definition der Lösungstension geben. Wir wollen hier noch auf einen besonders interessanten Fall des Lösungsdruckes eingehen, nämlich den elektrolytischen L ö s u n g s d r u c k der Metalle. Die Metalle sind in den gewöhnlichen Lösungsmitteln, z. B. Wasser, vollständig unlöslich, dagegen kann man, wie wir weiter unten (s. den Abschnitt 7 b β „Elektrolytlösungen") sehen werden, Lösungen ihrer elektrisch geladenen Atome, sogenannter Ionen herstellen. Man muß also annehmen, daß ein Metall, in Wasser getaucht, Ionen aussendet und so einen Lösungsdruck ausübt. Da diese Ionen aber elektrisch geladen sind, und zwar positiv, so muß sich das Metall im entgegengesetzten Sinne, also negativ, aufladen, und zwar um so stärker, je mehr Ionen in Lösung gegangen sind. Dadurch übt aber das Metall auf die Ionen eine elektrostatische Anziehung aus, die immer größer wird, so daß sie schließlich dem elektrolytischen Lösungsdruck das Gleichgewicht hält. Dieser Zustand ist nun, da die Ionen sehr große elektrische Ladungen tragen, schon erreicht, nachdem erst minimale Spuren Metall, die analytisch auch mit den feinsten Hilfsmitteln nicht nachweisbar sind, in Lösung gegangen sind. Auf Grund dieser Anschauung hat N e r n s t die Theorie der galvanischen Elemente entwickelt (vgl. den Artikel „P o t e n t i a l. E l e k t r o c h e m i s c h e s P o t e n t i a l").

5. Lösungen von Gasen. 5a) In G a s e n. P a r t i a l d r u c k g e s e t z v o n D a l t o n. Die Gase sind sämtlich unbegrenzt miteinander mischbar. Habe ich also zwei verschiedene Gase nebeneinander, so diffundieren beide so lange ineinander, bis ein vollständig homogenes Gemisch entstanden ist. Die Eigenschaften eines Gasgemisches setzen sich additiv aus denen seiner Komponenten zusammen. Mische ich z. B. ein l Sauerstoff

unter dem Druck von $^1/_5$ Atmosphären mit ein l Stickstoff unter dem Drucke von $^4/_5$ Atmosphären, so erhalte ich ein l Gasgemisch von einer Atmosphäre Druck. Zu dem gleichen Gemisch gelange ich, wenn ich $^1/_5$ l Sauerstoff und $^4/_5$ l Stickstoff, beide unter Atmosphärendruck miteinander mische. Dieses Verhalten wird durch das von Dalton entdeckte und nach ihm benannte Partialdruckgesetz wiedergegeben, welches aussagt, daß in einem Gasgemisch jedes Gas denselben Druck resp. Partialdruck ausübt, den es in reinem Zustande in dem gleichen Volumen bei derselben Temperatur ausüben würde. Ebenso setzen sich alle anderen Eigenschaften eines Gasgemisches wie Wärmekapazität, Lichtbrechung usw. additiv aus denen der einzelnen Komponenten zusammen. Hiermit steht im Zusammenhang, daß bei der Diffusion von Gasen ineinander bei konstantem Volum d. h. ohne äußere Arbeitsleistung, keine Wärmetönung auftritt, genau so wie beim Ausströmen eines Gases ins Vakuum. Jedoch gelten diese einfachen Gesetze nur soweit, als die Gase noch als ideale betrachtet werden können und den Gesetzen von Boyle und Gay-Lussac gehorchen, falls also die Gase nicht zu stark verdichtet sind. Es erklärt sich dies nach den Anschauungen der kinetischen Gastheorie daraus, daß bei verdünnten Gasen die Wechselwirkungen der einzelnen Moleküle aufeinander, also auch die von Molekülen verschiedener Gase, zu vernachlässigen sind, woraus sich ohne weiteres das additive Verhalten der Gasgemische ergibt. Ausgeschlossen ist natürlich der Fall, daß die verschiedenen Gase sich chemisch beeinflussen z. B. sich zu einem neuen Gase verbinden. Es ergibt sich hieraus auch, daß bei höheren Drucken, bei denen die Wechselwirkungen der Moleküle untereinander merklich werden, ebenso wie bei einheitlichen Gasen auch bei Gemischen die einfachen Gesetzmäßigkeiten nicht mehr gelten können. Es gilt dann z. B. nicht mehr das Daltonsche Gesetz, sondern die Partialdrucke hängen in viel komplizierterer Weise von den Drucken der reinen Komponenten ab. Van der Waals, der für den Zusammenhang zwischen Druck und Volum bei komprimierten einheitlichen Gasen eine Formel aufgestellt hat, bei der durch Einführung zweier für jeden Stoff spezifischen Konstanten a und b Volum und Anziehungskraft der Moleküle berücksichtigt werden, hat gezeigt, daß seine Gleichung auch für Gemische gilt, wobei die Konstanten a und b von der Zusammensetzung des Gemisches abhängen. Jedoch gibt auch die Theorie von van der Waals die Verhältnisse nur qualitativ wieder (vgl. den Artikel „Gase").

5b) In Flüssigkeiten. Absorptionsgesetz von Henry. Die Löslichkeit von Gasen in Flüssigkeiten ist sehr verschieden und hängt von Druck und Temperatur sowie der chemischen Natur des Gase und der Flüssigkeit ab. In Quecksilber z. B. sind alle Gase vollständig unlöslich, in Wasser manche sehr stark, wie Chlorwasserstoff, andere weniger, manche fast gar nicht löslich, wie Wasserstoff. Ueber die Abhängigkeit der Gaslöslichkeit vom Druck kann man auf Grund des Prinzipes von Le Chatelier-Braun (vgl. den Artikel „Thermochemie") von vornherein folgendes aussagen. Da das Volum des Systems Wasser + Gas bei der Auflösung stark abnimmt, wird die Löslichkeit bei Erhöhung des Druckes steigen. Quantitativ gilt hierfür das von Henry gefundene nach ihm benannte Gesetz: Die Menge des von einem bestimmten Volumen Flüssigkeit gelösten Gases ist proportional dem Drucke, unter dem dieses Gas steht. Oder, da die Dichte, d. h. die Menge des in einem bestimmten Gasvolumen enthaltenen Gases, ebenfalls proportional dem Druck ist, kann man auch sagen, von einer gegebenen Flüssigkeitsmenge wird unabhängig vom Drucke stets dasselbe Volumen des Gases aufgenommen. Dieses Volumen kann also als Maß für die Löslichkeit gelten. So bezeichnete Bunsen das auf 0 Grad reduzierte Gasvolum, das bei 760 mm Druck von der Volumeinheit Flüssigkeit absorbiert wird, als Absorptionskoeffizienten. Praktischer und einwandsfreier, weil nicht willkürlich die Temperatur von 0 Grad als Vergleichspunkt eingeführt wird, ist der Ostwaldsche Löslichkeitskoeffizient, der das Verhältnis der Konzentrationen des Gases in der flüssigen und in der gasförmigen Phase angibt. Das Henrysche Gesetz gilt auch für Gasgemische, indem sich entsprechend dem Daltonschen Gesetz jedes Gas proportional seinem Partialdrucke auflöst. Die Gültigkeit des Henryschen Gesetzes erstreckt sich ungefähr ebensoweit wie die der oben erwähnten Gasgesetze, d. h. es treten bei höheren Drucken und leichter kondensierbaren Gasen Abweichungen auf. Jedoch gehorchen auch einige verdünnte Gase, die zugleich sehr stark löslich sind, dem Henryschen Gesetze nicht, z. B. Chlorwasserstoff und Ammoniak in Wasser. In diesem Falle kann man nachweisen, daß die betreffenden Gase in der Lösung eine chemische Veränderung erfahren, sie zerfallen z. B. im vorliegenden Falle in Ionen.

Die Temperatur beeinflußt die Löslichkeit der Gase, im Gegensatz zu der fester und flüssiger Körper in dem Sinne, daß im allgemeinen bei wachsender Temperatur die Gase weniger löslich werden und zwar ist in der Regel der Temperaturkoeffizient der Löslichkeit um so größer, je größer diese selbst ist.

Nach dem Le Chatelierschen Prinzip findet nun ein Vorgang, der durch Temperaturerhöhung gehemmt wird, unter Wärmeentwicklung statt. Es wird also beim Auflösen eines Gases in einer Flüssigkeit Wärme frei, was auch mehrfach experimentell nachgewiesen wurde.

Ueber die Abhängigkeit der Löslichkeit von der chemischen Konstitution des Gases oder der Flüssigkeit sind allgemeine Gesetze nicht bekannt. Im allgemeinen kann man sagen, daß ein Gas um so leichter löslich ist, je leichter es sich verflüssigen läßt. So ist Kohlensäure in fast allen Lösungsmitteln besser löslich als Wasserstoff.

Für den Einfluß des Lösungsmittels soll eine von Just aufgefundene Regelmäßigkeit erwähnt werden. Ordnet man nämlich für ein bestimmtes Gas, z. B. Kohlensäure, die Flüssigkeiten nach ihrem Lösungsvermögen in eine Reihe, so erhält man für ein beliebiges anderes Gas, z. B. Wasserstoff oder Stickstoff, dieselbe Reihenfolge. Doch gilt diese Regel nur angenähert.

5c) In festen Körpern. Auch feste Körper nehmen, mit einem Gase in Berührung gebracht, dieses oft in merklicher Menge auf. Holzkohle z. B. absorbiert, namentlich bei niedrigen Temperaturen, Luft und andere Gase begierig. Jedoch sind hierbei zwei Vorgänge zu unterscheiden. Einmal nämlich, und das ist der bei weitem häufigere Fall, verdichten fast alle festen Körper besonders bei feiner Verteilung, Gas an ihrer Oberfläche. Hierher gehört z. B. die oben erwähnte Absorption durch Holzkohle oder auch die Aufnahme von Sauerstoff durch Platinmoor. Es handelt sich hierbei um eine Oberflächenwirkung, die man als Adsorption bezeichnet, und es entsteht hierbei keine homogene Lösung des Gases in dem festen Körper. Doch findet sich auch dieser Fall, die Okklusion, vor, wenngleich viel seltener. So okkludiert massives Palladium Wasserstoff bis zum tausendfachen seines eigenen Volums, wobei allerdings sicher auch chemische Wirkungen mitspielen. Ueberhaupt okkludieren die meisten Metalle Wasserstoff, aber auch andere Gase in nachweisbaren Mengen. Z. B. diffundiert Wasserstoff glatt durch ein glühendes Platinblech hindurch.

6. Lösungen von Flüssigkeiten. 6a) In Gasen. Die Lösung einer Flüssigkeit in einem Gase ist als Mischung des von der Flüssigkeit entsandten Dampfes mit dem Gase aufzufassen. Eine solche Mischung ist also einfach ein Gasgemisch, und es gelten die für ein solches aufgeführten Gesetze, wie es überhaupt unmöglich ist zwischen Gasen und Dämpfen einen scharfen Unterschied zu machen. Eine Flüssigkeit verdampft in ein Gas genau so wie ins Vakuum, und es gilt für den Dampf ebenso wie für das Gas das Daltonsche Partialdruckgesetz. Dies ist jedoch auch hier nur für nicht zu hohe Drucke der Fall, da sonst die Verhältnisse komplizierter werden. Meistens steigt bei Erhöhung des Gasdruckes auch der Dampfdruck der Flüssigkeit.

6b) In Flüssigkeiten. Bei Lösungen von Flüssigkeiten in Flüssigkeiten finden sich alle möglichen Fälle der Löslichkeit verwirklicht. Quecksilber ist in Wasser unlöslich, Aether begrenzt und Alkohol unbegrenzt löslich. Die ersten beiden Fälle wollen wir, wie schon oben bemerkt, zusammenfassen und wollen zuerst die begrenzt mischbaren Flüssigkeiten behandeln.

α) Begrenzt mischbare Flüssigkeiten. Kritischer Lösungsdruck. Dampfdruck. Destillation. Füge ich zu einer Flüssigkeit A, in der eine andere B begrenzt löslich ist, B hinzu, so wird dieses so lange von A aufgelöst, bis A an B gesättigt ist. Füge ich nun zu der Lösung weiter B hinzu, so bildet sich eine von der ursprünglichen Lösung durch eine scharfe Grenze getrennte Schicht, die jedoch, da auch A in B im allgemeinen löslich sein wird, nicht aus reinem B, sondern aus einer gesättigten Lösung von A in B besteht. Erhöhe ich nun die Temperatur, so wird für gewöhnlich sowohl die Löslichkeit von B in A als auch die von A in B wachsen, die Zusammensetzungen der beiden gesättigten Lösungen werden bei steigender Temperatur einander immer näher kommen, bis sie schließlich bei einem bestimmten Punkte identisch werden. Diesen Punkt, oberhalb dessen die beiden Flüssigkeiten also unbegrenzt mischbar werden, nennt man kritische Lösungstemperatur aus Analogie mit dem Verhalten einer einheitlichen Flüssigkeit, bei welcher der Druck und mithin auch die Dichte des gesättigten Dampfes bei steigender Temperatur beständig wächst, bis er beim sogenannten kritischen Punkt mit der Flüssigkeit identisch wird. Zur näheren Erläuterung diene als Beispiel, das von Rothmund untersuchte Flüssigkeitspaar Schwefelkohlenstoff-Methylalkohol, dessen Verhalten in Figur 1 wiedergegeben ist. Auf der Ordinatenachse ist der Prozentgehalt an Schwefelkohlenstoff, auf der Abszissenachse die Temperatur in Celsiusgraden aufgetragen. Bei 10 Grad enthält also, wie wir aus dem Diagramm ablesen können, die mit Schwefelkohlenstoff gesättigte Methylalkohollösung 45 % Schwefelkohlenstoff und die an Methylalkohol gesättigte Schwefelkohlenstofflösung 98½ % Schwefelkohlenstoff, also 1½ % Methylalkohol. Bei steigender Temperatur nimmt die Löslichkeit beider Stoffe ineinander zu, so daß die beiden Aeste der Kurve sich bei 40,5 Grad treffen, d. h.

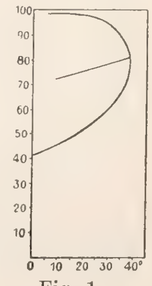


Fig. 1.

an diesem Punkte wird die Zusammensetzung beider gesättigter Lösungen identisch, und 40,5 Grad ist die kritische Lösungstemperatur. Die Zusammensetzung der Lösung bei dieser Temperatur ist experimentell schwierig zu ermitteln, da, wie man an der Form der Kurve sieht, zu einer kleinen Aenderung der Temperatur schon eine große der Zusammensetzung gehört. Doch hilft hierbei eine Regelmäßigkeit, die in analoger Weise für Dampfdichte und Flüssigkeitsdichte einer einheitlichen Flüssigkeit gilt und zur einfachen Bestimmung der Dichte beim kritischen Punkt dient, die sogenannte Regel der graden Mittellinie von Cailletet und Mathias. Trage ich nämlich in obiger Figur zu jeder Temperatur den arithmetischen Mittelwert der Zusammensetzungen der beiden zu dieser Temperatur gehörigen gesättigten Lösungen auf, so erhalte ich eine grade Linie. Der Punkt auf ihr, der der kritischen Lösungstemperatur entspricht, gibt die Zusammensetzung der Lösung bei dieser Temperatur. Es gibt aber auch Flüssigkeitspaare, deren gegenseitige Löslichkeit mit sinkender Temperatur zunimmt, und die eine untere kritische Lösungstemperatur besitzen. Die Kurve, die die Zusammensetzung der beiden gesättigten Lösungen in ihrer Abhängigkeit von der Temperatur wiedergibt, sieht dann so wie in Figur 2 aus. Ein solches

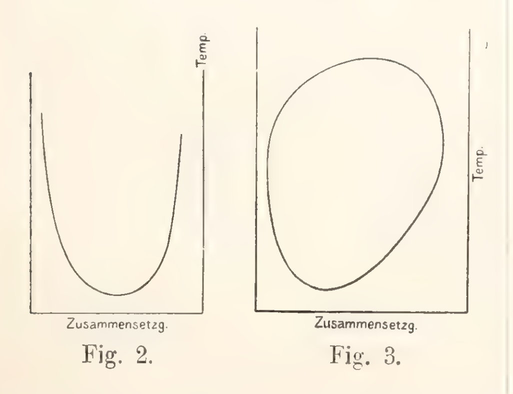


Fig. 2. Fig. 3.

Paar ist z. B. Wasser und Diäthylamin. Die Flüssigkeiten werden also unterhalb einer bestimmten Temperatur unbegrenzt mischbar. Bei manchen Systemen, hauptsächlich jedoch bei solchen, die aus drei Flüssigkeiten bestehen, hat man einen oberen und unteren kritischen Lösungspunkt gefunden, so daß die Löslichkeitskurve die in der Figur 3 dargestellte geschlossene Form hat und die Löslichkeit ein Minimum durchläuft. Als Beispiel hierfür sei Wasser und Nikotin angeführt. Schließlich sei noch bemerkt, daß die Lage des kritischen Lösungspunktes auch vom Drucke beeinflußt wird. In vielen Fällen ist es übrigens überhaupt nicht möglich, die kritische Lösungstemperatur zu erreichen. Den Grund hierfür werden wir bei der Besprechung des Dampfdruckes dieser Lösungen einsehen. Die Theorie dieser Erscheinungen ist ebenfalls von van der Waals und seinen Schülern entwickelt worden.

Es entsteht nun die Frage nach dem Druck und der Zusammensetzung des Dampfes, der von Gemischen begrenzt löslicher Flüssigkeiten entsandt wird, und zwar wollen wir im folgenden nur den Dampf gesättigter Lösungen betrachten. Sind zwei Flüssigkeiten nur unmerklich ineinander löslich, z. B. Wasser in Oel, so beeinflussen sie sich, auch was ihren Dampfdruck anlangt, gegenseitig gar nicht, sondern der von ihrem Gemenge entsandte Dampf ist nach dem Daltonschen Partialdruckgesetze in bezug auf Druck und Zusammensetzung gleich der Summe der von den beiden reinen Flüssigkeiten entsandten Dämpfe. Etwas anders liegt die Sache bei merklich löslichen Flüssigkeiten. Eine an A gesättigte Lösung von B wird Dampf entsenden, der sowohl A als B enthält, aber beide nicht mit dem Druck, der den reinen Flüssigkeiten entsprechen würde. Ebenso wird es sich mit der gesättigten Lösung von B in A verhalten. Hier gilt jedoch ein von Konowalow aufgefundenes Gesetz, daß nämlich die von den beiden gesättigten Lösungen entsandten Dämpfe gleiche Zusammensetzung und gleichen Druck haben müssen. Die Notwendigkeit hiervon ist leicht an dem in Figur 4 dargestellten Modell einzusehen. In einem zu einem Kreise geschlossenen Glasrohr befinden sich die beiden miteinander im Gleichgewicht stehenden gesättigten Lösungen. Wäre nun der von der einen Flüssigkeit entsandte Dampf nicht völlig gleich dem der anderen, so müßte ständig Dampf von der einen Oberfläche zur anderen überdestillieren, so daß man bei konstanter Temperatur einen Kreisprozeß, der imstande wäre, ständig Arbeit zu liefern, erhalten würde, was nach dem zweiten Hauptsatze der Thermodynamik unmöglich ist.

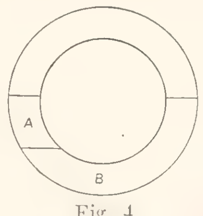


Fig. 4.

Zu den beiden gesättigten Lösungen verschiedener Zusammensetzung gehört also nur eine im Gleichgewicht mit beiden befindliche Dampfphase von bestimmter Zusammensetzung. Steigere ich nun die Temperatur, um den kritischen Lösungspunkt zu erreichen, so kann es geschehen, daß ich schon vorher den kritischen Punkt einer der beiden Lösungen erreiche, so daß diese dann mit der Dampfphase identisch wird. Bei Aether und

Wasser z. B. liegt die kritische Temperatur der Aetherlösung unterhalb der kritischen Lösungstemperatur, so daß ich diese überhaupt nicht erreichen kann.

Es ist nun leicht, die Verhältnisse bei der Destillation zweier miteinander gesättigter Flüssigkeiten zu übersehen. Sieden findet statt, falls der Dampfdruck, der ja für beide flüssige Phasen derselbe ist, gleich dem gerade herrschenden Drucke ist. Dies gilt natürlich auch für unmerklich lösliche Flüssigkeiten, da dann eben dieser Dampfdruck gleich der Summe der beiden Dampfdrucke der reinen Substanzen ist. In allen Fällen geht bei konstanter Siedetemperatur ein Destillat über, dessen Zusammensetzung gleich der des von dem Gemenge entsandten Dampfes ist, solange bis eine der beiden gesättigten Lösungen verschwunden ist, was von der Zusammensetzung von Dampf und Lösungen und den angewandten Mengenverhältnissen abhängt. Was geschieht, wenn nur noch eine Flüssigkeitsphase vorhanden ist, wird weiter unten bei der Destillation unbegrenzt mischbarer Flüssigkeiten besprochen werden. Praktisch macht man von diesen Eigenschaften Gebrauch bei der sogenannten Destillation mit Wasserdampf. Leitet man nämlich den Dampf kochenden Wassers durch ein auf etwa 100° erwärmtes Gemenge, so nimmt dieser einen flüchtigen Stoff seinem Dampfdruck entsprechend mit fort, also mit dem Dampfdruck der reinen Substanz, falls diese kein Wasser löst, oder anderenfalls mit dem Partialdruck, der an Wasser gesättigten Lösung, wobei sich die dem äußeren Druck entsprechende Siedetemperatur derselben einstellt. Man erreicht also dasselbe wie bei der Destillation im Vakuum, indem die Stoffe bereits bei einer niedrigeren als der Siedetemperatur bei Atmosphärendruck überdestillieren, natürlich mit geringerem Partialdruck als einer Atmosphäre.

β) Unbegrenzt mischbare Flüssigkeiten. Dampfdruck. Thermodynamik. Destillation. Sonstige Eigenschaften. Die Eigenschaften von Gemischen unbegrenzt mischbarer Flüssigkeiten lassen sich mitunter nach der Mischungsregel aus den Eigenschaften der reinen Stoffe berechnen, in den meisten Fällen treten jedoch mehr oder minder starke Abweichungen auf. Die wichtigsten und am besten untersuchten Eigenschaften dieser Gemische sind Druck und Zusammensetzung ihres gesättigten Dampfes in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Mischung bei konstanter Temperatur. Die bei zwei Flüssigkeiten vorkommenden Fälle sind in Figur 5 veranschaulicht, in der die Zusammensetzung der Mischung in Molprozenten auf der Abszisse, der Druck des Dampfes auf der Ordinate aufgetragen ist. Der Anfangspunkt der Abszisse entspricht 0 Prozent B oder reinem A, und die dazu gehörige Ordinate dem Dampfdruck von reinen A, der Endpunkt entspricht reinem B und die dazugehörige Ordinate dessen Dampfdruck, die dazwischenliegenden Punkte der Kurve stellen also die Dampfdrucke aller möglichen Zusammensetzungen eines Gemisches von A und B dar. Wie wir sehen, sind hier drei Fälle zu unterscheiden: 1. der Dampfdruck des Gemisches liegt stets über dem des weniger flüchtigen und unter dem des flüchtigeren Bestandteils (Kurve I), die Kurve verläuft also zwischen den Höhen ihres Anfangs- und Endpunktes; 2. der Dampfdruck des Gemisches ist unter Umständen kleiner als derjenige des weniger flüchtigen Bestandteils (Kurve II), die Kurve hat ein Minimum; 3. der Dampfdruck des Gemisches ist unter Umständen höher als der des flüchtigeren Bestandteils (Kurve III), die Kurve hat ein Maximum. Wir wollen nun erst einige allgemeine Sätze über den Dampfdruck von Gemischen anführen, um sie dann auf diese speziellen Fälle anzuwenden.

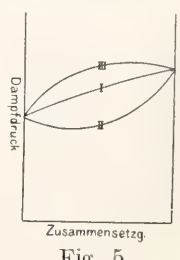


Fig. 5.

Man kann nämlich von vornherein über den Partialdampfdruck einer Komponente eines Gemisches aussagen, daß er kleiner sein muß als der Dampfdruck der reinen Komponente bei derselben Temperatur. Wäre er nämlich ebenso groß oder größer, so würde aus dem Dampfe des Gemisches die reine Komponente sich kondensieren, und es würde von selbst eine Entmischung der Flüssigkeiten erfolgen. Da diese sich aber auch von selbst vermischen, so würde hieraus ein Kreisprozeß resultieren, aus dem man bei konstanter Temperatur ständig Arbeit gewinnen könnte, was dem zweiten Hauptsatze der Thermodynamik widerspricht. Es muß also in einem Gemisch der Partialdampfdruck einer jeden Komponente kleiner sein als ihr Dampfdruck in reinem Zustande und demnach der Totaldampfdruck des Gemisches kleiner als die Summe der Dampfdrucke der reinen Komponenten. Ferner läßt sich ein allgemeiner Satz über die Veränderung der Zusammensetzung eines Gemisches durch Verdampfung aufstellen. Diese muß nämlich nach dem Le Chatelierschen Prinzip immer so erfolgen, daß der Dampfdruck der zurückbleibenden Flüssigkeit kleiner wird oder mindestens konstant bleibt. Man kann sich dies auch folgendermaßen klar machen. Ich habe ein durch einen beweglichen Stempel geschlossenes Gefäß, in dem sich ein flüssiges Gemisch und darüber sein gesättig-

ter Dampf befinden, dessen Druck durch ein auf den Stempel gelegtes Gewicht im Gleichgewicht gehalten wird. Würde nun der Dampfdruck der Flüssigkeit infolge Verdampfung steigen, so müßte bei der kleinsten Hebung des Stempels ein wenig Flüssigkeit verdampfen und der Dampfdruck steigen. Infolgedessen würde der Stempel weitergehoben werden, es würde wieder Flüssigkeit verdampfen, der Dampfdruck noch mehr steigen usw., d. h. es würde überhaupt kein stabiler Gleichgewichtszustand möglich sein. Infolge von Verdampfung muß sich also die Zusammensetzung eines Gemisches so ändern, daß sein Dampfdruck kleiner wird oder konstant bleibt. Letzteres ist nun der Fall, wenn die Zusammensetzung einem Maximum oder Minimum der Dampfdruckkurve entspricht. Denn ist z. B. die Zusammensetzung der Mischung eine derartige, daß ihr Dampfdruck ein Minimum ist, so kann sich bei Verdampfung die Zusammensetzung der Lösung nicht ändern, da ihr Dampfdruck sich nicht ändern kann, weil er bereits der kleinst mögliche ist. Es muß dann auch die Zusammensetzung des Dampfes gleich der der Lösung sein, weil diese sonst durch Verdampfung geändert würde. Ebenso muß, wenn ich den gesättigten Dampf über der Mischung komprimiere, so daß sich ein Teil verflüssigt, der Dampfdruck der Lösung wachsen, oder falls die Lösung einem Maximum des Dampfdrucks entspricht, dieser konstant bleiben, und Dampf und Mischung müssen die gleiche Zusammensetzung haben.

Als Beispiel für eine Dampfdruckkurve mit einem Minimum, ein übrigens seltener Fall, sei das Flüssigkeitspaar Wasser und Ameisensäure angeführt, für ein Maximum Wasser und Propylalkohol, für eine Kurve ohne Wendepunkt Wasser und Methylalkohol. Diese Kurvenform ist die bei weitem häufigste.

Es ist nun leicht, auf Grund dieser Dampfdruckkurven die Verhältnisse bei der Destillation zu übersehen. Da hierbei nicht die Temperatur, sondern der Druck konstant gehalten wird, so folgt aus dem Satze, daß bei der Verdampfung der Dampfdruck der zurückbleibenden Flüssigkeit sinkt, der Satz, daß bei der Destillation der Siedepunkt steigt. Einem Maximum des Dampfdrucks entspricht ein Minimum der Siedetemperatur und einem Minimum des Dampfdrucks ein Maximum der Siedetemperatur, in welchen beiden Fällen bei konstantem Siedepunkt ein Destillat von gleicher Zusammensetzung wie die Lösung übergeht. Man hat daher früher derartige Lösungen, z. B. Wasser und Chlorwasserstoff für chemische Verbindungen, sogenannte Hydrate gehalten.

Das dies nicht der Fall ist, wird dadurch bewiesen, daß die Zusammensetzung dieser Lösung mit maximalem oder minimalem Dampfdruck sich ändert, wenn man die Temperatur und somit den Druck bei der Destillation ändert, was bei einer chemischen Verbindung nicht der Fall sein dürfte. (S. Abschnitt 1.)

Ueber die Möglichkeit einer Trennung zweier Flüssigkeiten durch Destillation kann man folgendes sagen. Bildet das Flüssigkeitspaar eine Dampfdruckkurve ohne Wendepunkt, so geht aus einer Mischung beliebiger Zusammensetzung ein Destillat über, das mehr von der flüchtigeren Komponente mit niedrigerem Siedepunkt enthält, während sich der zurückbleibende Rest an der Flüssigkeit mit dem höheren Siedepunkt anreichert, wobei die Zusammensetzung immer in Molen gezählt ist. Fängt man nun das Destillat in einzelnen Anteilen auf, so werden die ersten mehr von der flüchtigeren, die letzten mehr von der weniger flüchtigen Komponente enthalten als die ursprüngliche Mischung. Wiederholt man dieses Verfahren, die fraktionierte Destillation, genügend oft, so kann man schließlich die beiden Bestandteile völlig rein erhalten. Allerdings müssen die Siedepunkte der beiden Flüssigkeiten einigermaßen verschieden sein, damit die Methode praktisch durchführbar wird. Dagegen ist es überhaupt nicht möglich, die Trennung bei einem Flüssigkeitspaar mit einem Maximum oder Minimum in der Dampfdruckkurve durchzuführen. Existiert z. B. ein Gemisch mit maximalem Dampfdruck, also minimalem Siedepunkt, so ist dieses bei jeder Zusammensetzung der Mischung der flüchtigste Bestandteil, und man kann diesen Fall auf den vorigen zurückführen, indem jetzt das Gemisch mit dem niedrigsten Siedepunkt an die Stelle der leichter siedenden Komponente tritt. Man sieht also, daß man im günstigsten Falle als Resultat der fraktionierten Destillation einen Anteil von der Zusammensetzung dieses „Minimumgemisches“ und außerdem diejenige Komponente in reinem Zustande erhält, von der in dem ursprünglichen Gemisch mehr enthalten war, als der Zusammensetzung des Minimumgemisches entspricht. Ganz analog verhalten sich zwei Flüssigkeiten, die ein Gemisch mit maximalem Siedepunkt bilden. Diese ist dann der am wenigsten flüchtige Bestandteil und kann durch Destillation von der im Ueberschuß vorhandenen Komponente getrennt werden. Schließlich sei noch erwähnt, daß für einen Teil der Gemische I, Dampfdruckkurve ohne Wendepunkt experimentell besonders einfache Verhältnisse gefunden wurden, indem der Partialdampfdruck einer jeden Komponente proportional ihrem Molenbruch im Gemisch ist. Die Dampfdruckkurve wird dann eine gerade Linie, wenn man die Zu-

sammensetzung des Gemisches in Molenbrüchen aufträgt. Ebenfalls sehr einfache Gesetze, die theoretisch ableitbar sind, gelten für solche Gemische, in denen die eine Komponente in großem Ueberschuß vorhanden ist, für verdünnte Lösungen. Hierfür sei auf den Abschnitt über den Dampfdruck von Lösungen fester Körper in Flüssigkeiten verwiesen.

Eine ebenso große Mannigfaltigkeit wie die Dampfdrucke flüssiger Gemische zeigen auch ihre anderen Eigenschaften. Beim Vermischen findet teils Kontraktion, teils Dilatation statt, teils Temperaturerhöhung, teils Temperaturerniedrigung. Oft pflegt besonders starke Kontraktion mit großer Wärmeentwickelung Hand in Hand zu gehen, was möglicherweise auf Bildung einer chemischen Verbindung zurückzuführen ist. Van der Waals hat eine allgemeine Theorie der Flüssigkeitsgemische aufgestellt, die jedoch die Tatsachen nur in großen Zügen wiedergibt. Von Gemischen mit mehr als zwei Komponenten sind nur noch die ternären mehrfach untersucht worden, wobei ähnliche, aber kompliziertere Verhältnisse gefunden wurden wie bei den binären Gemischen.

6c) In festen Körpern. Derartige Lösungen sind kaum bekannt, doch dürften hier dieselben Gesetze gelten, wie für feste Lösungen im allgemeinen, weshalb auf diesen Abschnitt verwiesen sei.

7. Lösungen von festen Körpern. 7a) In Gasen. Falls ein fester Körper einen merkbaren Dampfdruck besitzt, so verdampft er in ein Gas wie ins Vakuum. Ueberhaupt gilt hier genau das für Lösungen von Flüssigkeiten in Gasen Gesagte. Bemerkenswert ist, daß auch bei festen Körpern die Löslichkeit durch Erhöhung des Druckes manchmal stark gesteigert werden kann.

7b) In Flüssigkeiten. *α*) Allgemeines. Unter den Lösungen beanspruchen diejenigen fester Körper in Flüssigkeiten, und unter ihnen wieder die verdünnten Lösungen aus verschiedenen Gründen das weitaus größte Interesse. Erstens haben wir es praktisch meistens mit solchen Lösungen zu tun. Die meisten chemischen Reaktionen bei der Analyse, in der Technik und in der Natur spielen sich zwischen Stoffen in gelöstem Zustande ab. Zweitens sind die Eigenschaften dieser Lösungen, namentlich der verdünnten, theoretisch wie experimentell am besten untersucht, und es haben sich hierbei eine Reihe einfacher und aus allgemeinen Prinzipien ableitbarer Gesetzmäßigkeiten ergeben, welche eine glänzende und äußerst fruchtbare Entwicklung aller hiermit zusammenhängenden Teile der Chemie und physikalischen Chemie ermöglicht haben. Wir wollen nun zuerst die allgemeine Theorie der Lösungen, die wir hauptsächich den grundlegenden Arbeiten van't Hoffs verdanken, in möglichst einfacher und anschaulicher Form entwickeln, um im zweiten Abschnitt eine besonders wichtige und interessante Klasse von Lösungen, die der Elektrolyte deren Theorie Arrhenius gegeben hat, zu besprechen. Es ist noch zu bemerken, daß diese Theorie der Lösungen auch für alle anderen Arten von Lösungen z. B. von Flüssigkeiten und Gasen in Flüssigkeiten und für feste Lösungen gilt, zum Teil natürlich in etwas veränderter Form. Es soll hierauf an den geeigneten Stellen hingewiesen werden. Da jedoch, wie oben bemerkt, die Lösungen fester Körper in Flüssigkeiten aus verschiedenen Gründen eine Vorzugsstellung einnehmen, so wird erst bei ihrer Besprechung die allgemeine Theorie der Lösungen behandelt, wie sie auch historisch zuerst an ihnen entwickelt wurde.

Osmotischer Druck der Lösung. Isotonische Lösungen. Man geht hierzu am besten nach van't Hoff vom Begriff des osmotischen Druckes aus, für dessen ausführlichere Darstellung auf den Artikel „Osmotische Theorie" verwiesen sei, während hier nur folgendes erwähnt sei. Es gibt gewisse Membranen, welche die Eigenschaft haben, für manche Stoffe undurchdringlich zu sein, andere dagegen hindurchzulassen. Gegen eine wässerige Zuckerlösung verhält sich z. B. eine in eine Tonzelle eingelagerte Membran von Ferrocyankupfer derartig, daß sie das Wasser leicht, den Zucker aber gar nicht hindurch diffundieren läßt. Eine derartige Membran nennt man halbdurchlässig, und man nimmt an, daß sich für jeden gelösten Stoff eine solche für ihn undurchlässige, impermeable, für das Lösungsmittel dagegen permeable Wand finden ließe. Habe ich nun, wie in Figur 6 dargestellt, in einem Gefäß eine Lösung, die durch einen solchen semipermeablen Stempel von reinem Lösungsmittel getrennt ist, so muß, da die Lösung sich zu verdünnen sucht, sich ein Bestreben zeigen, den für den gelösten Stoff undurchdringlichen Stempel zu verschieben, damit sich das Lösungsmittel mit der Lösung mischen kann. Will man dies verhindern, so wird man auf den Stempel eine Kraft, einen Druck ausüben müssen, der diesem Verschiebungsbestreben das Gleichgewicht hält. Diesen Druck nennt man den osmotischen Druck der Lösung. Anschaulich kann man sich sein Zustandekommen klar machen, wenn man bedenkt, daß von den Molekülen in der Lösung, die infolge der Temperaturbewegung hin und herfahren, die Lösungsmoleküle auf den Stempel überhaupt keinen Druck aus-

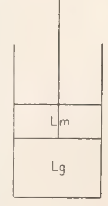


Fig. 6.

üben können, da sie durch ihn hindurchgehen, dagegen die gelösten Moleküle auf den Stempel nur von der Seite der Lösung her stoßen und so auf ihn einen Druck ausüben müssen, der ihn nach der Seite des reinen Lösungsmittels hin zu verschieben strebt. Dieser osmotische Druck wurde zuerst von Pfeffer an wässerigen Zuckerlösungen mittels einer Ferrocyankupfermembran und von mehreren anderen Forschern ebenfalls auf diesem direkten Wege gemessen, weit öfter jedoch wurde er aus Messungen von bestimmten anderen leichter meßbaren Eigenschaften der Lösungen berechnet (s. die folgenden Abschnitte). Hierbei ergab sich für seine Größe folgendes äußerst einfache, allgemein gültige Gesetz: „Der osmotische Druck eines gelösten Stoffes ist gleich dem Drucke, den er bei dieser Konzentration und gleicher Temperatur in gasförmigem Zustande ausüben würde, wenn er sich wie ein ideales Gas verhalten würde". Der Geltungsbereich dieses Gesetzes ist etwa der der gewöhnlichen Gasgesetze, d. h. es gilt nur bei nicht zu hohen Konzentrationen, also in verdünnten Lösungen. Das Gesetz läßt sich auch theoretisch mit Hilfe der kinetischen Molekulartheorie oder thermodynamisch auf Grund sehr allgemeiner Annahmen ableiten. Es gilt also für den osmotischen Druck P einer nicht zu konzentrierten Lösung die Gleichung $Pv = RT$, worin v dasjenige Volumen Lösung, in dem sich ein Mol gelöster Stoff befindet, R die universelle Gaskonstante und T die absolute Temperatur ist (also $t + 273 = T$, wenn t die Temperatur in Celsiusgraden ist), in vollständiger Analogie zur Gasgleichung $pv = RT$, in der p den Gasdruck und v das Volumen, welches ein Mol des Gases einnimmt, bezeichnet. Wir sehen also, daß die Analogie in dem Verhalten von Gasen und Lösungen, auf die schon beim Lösungsdruck hingewiesen wurde, im Wesen dieser Erscheinungen begründet ist. Wir sind jetzt auch imstande, den Lösungsdruck eines Stoffes genau zu definieren, nämlich als den osmotischen Druck seiner gesättigten Lösung. Das wichtigste ist jedoch, daß wir infolge dieser Analogie berechtigt sind, die Hypothese von Avogadro, daß nämlich in gleichen Volumina verschiedener Gase bei gleichem Druck und gleicher Temperatur die gleiche Anzahl Moleküle vorhanden sind, auf Lösungen zu übertragen. Hiernach sind in gleichen Volumina verschiedener Lösungen, die einen gleichgroßen osmotischen Druck ausüben, auch isotonische Lösungen genannt, bei gleicher Temperatur gleich viel Moleküle gelöster Substanz vorhanden. Dadurch wird es möglich, die Bestimmung des Molekulargewichts eines Stoffes auszuführen, nicht nur wie früher, wenn dieser in gasförmigem, sondern auch wenn er in gelöstem Zustande vorliegt. Da jedoch die direkte Messung des osmotischen Druckes praktisch recht schwierig, in vielen Fällen geradezu unmöglich ist, so hätte er kaum diese Bedeutung für die Erforschung der Lösungen erlangt, wenn er nicht in einfacher Beziehung zu leichter meßbaren Eigenschaften der Lösungen stünde. Hierfür kommen hauptsächlich Dampfspannung, Siedepunkt und Gefrierpunkt in Betracht, deren Zusammenhang mit dem osmotischen Druck durch einfache thermodynamische Betrachtungen erhellt.

Stellen wir uns z. B. in dem Modell der Figur 6, wo ein bestimmtes Volum Lösung durch einen halbdurchlässigen Stempel von reinem Lösungsmittel getrennt ist, vor, wir hielten dem osmotischen Druck, der den Stempel zu verschieben strebt, durch aufgelegte Gewichte das Gleichgewicht. Nimmt man nun ein ganz kleines Gewicht fort, so wird der Stempel verschoben und das auf ihm lastende Gewicht gehoben, bis der osmotische Druck infolge von Verdünnung durch hinzugetretenes Lösungsmittel soweit verringert ist, daß ihm das etwas verkleinerte Gewicht die Wage hält. Der osmotische Druck hat also bei der Verdünnung der Lösung eine Arbeit geleistet, er hat ein Gewicht g um eine bestimmte Strecke h gehoben. Die geleistete Arbeit ist also gh. Nun ist es natürlich gleichgültig, wodurch ich den Druck auf den Stempel ausübe. Ganz allgemein ist Druck gleich Kraft pro Flächeneinheit, die gesamte auf den Stempel wirkende Kraft also Druck × Fläche desselben. Wird der Angriffspunkt dieser Kraft um die Strecke h verschoben, so ist die geleistete Arbeit gleich dieser Strecke × der Kraft, gleich h × Fläche × Druck, gleich Volumen × Druck. Zählen wir, wie üblich, den Druck in Atmosphären, das Volumen in Litern, so erhalten wir die Arbeit in Literatmosphären (eine Literatmosphäre ist im C.G.S.-Maßsystem gleich $1{,}013 \cdot 10^9$ erg.). Während wir also beim Verdünnen einer Lösung auf dem gewöhnlichen Wege durch Hinzufügen des Lösungsmittels keine Arbeit gewinnen, sind wir vermittels des osmotischen Stempels imstande, den Vorgang der Verdünnung so zu leiten, daß er uns Arbeit leistet. Wollen wir nun das größtmögliche Quantum Arbeit, die maximale Arbeit, hierbei gewinnen, so müssen wir den Vorgang reversibel leiten, d. h. der Druck, gegen den die Arbeit geleistet wird, muß in jedem Augenblick möglichst gleich dem wirkenden osmotischen Druck der Lösung sein, so daß der Prozeß sehr langsam verläuft. Denn sonst würde Arbeit verloren gehen, z. B. durch Reibung, und weil die Konzentrationsunterschiede in der Lösung nicht Zeit hätten sich auszugleichen. Es ist natürlich praktisch unmöglich, die Verdünnung wirklich reversibel zu leiten; es ist

aber auch vollständig unnötig, da wir den Prozeß nur in Gedanken so verlaufen lassen, um die maximale Arbeit zu berechnen. Haben wir z. B. eine gesättigte Lösung in Berührung mit dem festen Bodenkörper, dann können wir uns die Auflösung so vorsichgehend denken, daß wir durch einen halbdurchlässigen Stempel, auf dem der Druck P gleich dem Lösungsdruck lastet, Lösungsmittel hinzutreten lassen, wobei die Konzentration und somit der osmotische Druck der Lösung infolge der Anwesenheit des Bodenkörpers stets konstant bleibt. Haben wir schließlich soviel Lösungsmittel hinzutreten lassen, daß ein Mol des festen Stoffes in Lösung gegangen ist, so hat das Volumen der Lösung um v zugenommen, wobei v eben das Volumen gesättigte Lösung ist, das ein Mol gelösten Stoff enthält. Die maximale geleistete Arbeit ist dann $P \times v$ gleich RT, falls die Lösung verdünnt ist und der osmotische Druck den Gasgesetzen gehorcht. Wir können daher den Satz aussprechen, daß die maximale Arbeit, die man bei der Auflösung eines Moles eines beliebigen Stoffes zu seiner verdünnten gesättigten Lösung gewinnen kann, stets dieselbe, nämlich RT ist. Natürlich kann man auch die maximale Arbeit bei der Verdünnung einer Lösung bis zu einer bestimmten Konzentration berechnen, und zwar ist diese gleich $RT\ln\frac{v_1}{v_2}$, wobei v_1 das Volum Lösung ist, welches nach der Verdünnung ein Mol gelösten Stoff enthält, v_2 das Volum, welches vor der Verdünnung ein Mol enthielt. Die Thermodynamik lehrt uns nun, daß wir genau dieselbe maximale Arbeit erhalten müssen, wenn wir die Verdünnung einer Lösung auf irgendeine andere Weise, z. B. durch Destillation, Schmelzen usw. des Lösungsmittels isotherm und reversibel vor sich gehen lassen. Da ich nun den osmotischen Druck verdünnter Lösungen, also die maximale bei Verdünnung zu gewinnende Arbeit kenne, erhalten wir vermöge dieser Zusammenhänge einfache Gesetze für Dampfspannung, Siedepunkt und Gefrierpunkt verdünnter Lösungen. Andererseits sind wir durch die Messung dieser Größen imstande, den osmotischen Druck, den ein gelöster Stoff ausübt, und somit seinen Molekularzustand auf einfache Weise zu bestimmen.

Dampfspannung. Siedepunkt. Molekulare Siedepunktserhöhung. In folgendem wollen wir den Zusammenhang zwischen osmotischem Druck und Dampfdruck einer Lösung von beliebiger Konzentration auf einem von Arrhenius angegebenen Wege ableiten, der mit dem oben angegebenen im Grunde identisch ist, jedoch den Vorzug großer Anschaulichkeit besitzt. Setzen wir eine mit einer Lösung gefüllte Zelle mit semipermeablen Wänden, die oben luftdicht durch einen Stopfen mit durchgehendem Steigrohr geschlossen ist, in ein Becherglas mit reinem Lösungsmittel, wie dies Figur 7 veranschaulicht, so wird die Lösung sich zu verdünnen streben, und es wird Lösungsmittel in die Zelle eindringen. Die Lösung wird daher im Steigrohr aufsteigen, und zwar so lange, bis der hierdurch entstehende hydrostatische Druck dem Verdünnungsbestreben der Lösung das Gleichgewicht hält, d. h. gleich ihrem osmotischen Druck geworden ist. Wir nehmen nun an, daß der von der Lösung entsandte Dampf nur Lösungsmittel enthält und der Dampfdruck des gelösten Stoffes über der Lösung unmeßbar klein ist, was für Lösungen von festen Stoffen in Flüssigkeiten wohl stets zutrifft.

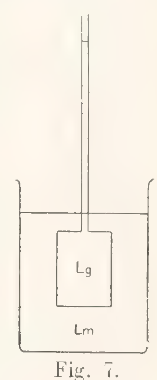


Fig. 7.

Es muß dann, damit Gleichgewicht herrscht, für den Dampf des Lösungsmittels die Bedingung gelten, daß sein Druck in allen horizontalen Schichten gleich ist. Es muß also der Dampfdruck über der Oberfläche der Lösung im Steigrohr gleich dem sein, der in dieser Höhe über der Oberfläche des reinen Lösungsmittels herrscht. Nenne ich die Höhe, bis zu der die Lösung über dem Spiegel der Außenflüssigkeit gestiegen ist, h, so ist der Dampfdruck der Lösung p' um das Gewicht einer Dampfsäule von der Höhe h kleiner als der Dampfdruck der reinen Flüssigkeit p. Sei s' das spezifische Gewicht des Dampfes, dessen Veränderlichkeit mit der Höhe in erster Annäherung vernachlässigt sei, so ist das Gewicht dieser Dampfsäule $h\,s'$, und es ist $p - p' = h.s.'$ Außerdem ist der osmotische Druck P gleich dem hydrostatischen Druck der Lösung im Steigrohr, deren spezifisches Gewicht s sei. Es ist also P gleich dem Gewicht einer Flüssigkeitssäule von der Höhe h, folglich $P = h.s$ oder $h = \frac{P}{s}$. Durch Kombination mit der vorhergehenden Gleichung erhalten wir für das Gesetz, welches den Dampfdruck einer Lösung mit ihrem osmotischen Druck verbindet: $p - p' = P\frac{s'}{s}$. Das spezifische Gewicht s' des Dampfes läßt sich nun aus seinem Drucke p nach den Gasgesetzen berechnen. Da für das Mol eines jeden verdünnten Gases die Gleichung $pv = RT$ gilt, so gilt für ein Gramm des Dampfes die Gleichung $pv = \frac{RT}{M}$ worin M das Molekulargewicht des Lösungsmittels und v das Volum eines Grammes Dampf ist. Sein spezifisches

Gewicht s' ist also $\frac{1}{v}$, und daher $p = s'\frac{RT}{M}$. In die obige Gleichung eingesetzt ergibt sich $P = \frac{p-p'}{p}\frac{RTs}{M}$. Der osmotische Druck einer Lösung läßt sich also berechnen, wenn man ihr spezifisches Gewicht und ihren Dampfdruck sowie das Molekulargewicht und den Dampfdruck des reinen Lösungsmittels kennt. Für verdünnte Lösungen kann überdies noch das spezifische Gewicht der Lösung gleich dem des Lösungsmittels gesetzt werden. Eine vollständig exakte für Lösungen beliebiger Konzentration gültige Formel erhält man, wenn man die Veränderlichkeit der Dichte des Dampfes und der Konzentration der Lösung mit der Höhe berücksichtigt oder den oben erwähnten Weg einschlägt und die maximale Arbeit berechnet, die man beim isothermen und reversiblen Hinzudestillieren von Lösungsmittel zur Lösung gewinnen kann. Es ergibt sich dann $P = RTN\ln\frac{p}{p'}$, worin N die Anzahl Mole Lösungsmittel sind, die vermittels eines halbdurchlässigen Stempels aus der Lösung herausgepreßt werden, wenn ihr Volumen um einen ccm abnimmt. Diese Gleichung gilt auch für den Fall, daß der gelöste Stoff flüchtig ist, für den Partialdampfdruck des Lösungsmittels, wie sich unter Zuhilfenahme von für den Dampf des gelösten Stoffes impermeablen Wänden leicht zeigen läßt. Wir wollen hier nur die Formel für verdünnte Lösungen diskutieren, weil nur für solche der osmotische Druck und somit auch die Dampfdruckerniedrigung einfachen Gesetzen folgt. Es gilt dann $P = RTc$, wenn wir $c = \frac{1}{v}$ setzen, so daß c die in 1 ccm Lösung enthaltene Anzahl Mole gelöster Stoff ist. Setzen wir dies in die oben abgeleitete Formel für P ein, so ergibt sich $c = \frac{p-p'}{p}\cdot\frac{s}{M}$ oder $\frac{p-p'}{p} = c\frac{M}{s}$. In dieser Formel sind vier Gesetze enthalten, die unabhängig von der Aufstellung der Theorie durch van 't Hoff vorher oder gleichzeitig damit experimentell gefunden worden sind. Das erste dieser Gesetze, von von Babo entdeckt, sagt aus, daß $\frac{p-p'}{p}$ unabhängig von der Temperatur ist, da diese ja in unserer Formel überhaupt nicht mehr vorkommt. Es ist also die relative Dampfspannungserniedrigung, wie man $\frac{p-p'}{p}$ nennt, derselben Lösung z. B. beim Siedepunkt und beim Gefrierpunkt die gleiche. Dieses Gesetz gilt streng nur, wenn die Verdünnungswärme der Lösung zu vernachlässigen ist, da nur dann der osmotische Druck der absoluten Temperatur proportional ist. Das zweite, von Wüllner gefundene Gesetz besagt, daß die relative Dampfspannungserniedrigung proportional der Konzentration des gelösten Stoffes ist, es ist $\frac{p-p'}{p}$ proportional c. Das dritte von Raoult aufgestellte Gesetz sagt aus, daß die relative Dampfspannungserniedrigung unabhängig von der Natur des gelösten Stoffes ist, die ja in unserer Formel ebenfalls nicht vorkommt, so daß $\frac{p-p'}{p}$ für dasselbe Lösungsmittel bei beliebigen gelösten Stoffen gleich ist für Lösungen gleicher molekularer Konzentration. Viertens hat Raoult auch schon den numerischen Wert der relativen Dampfspannungserniedrigung berechnen gelehrt, indem er dafür die Formel $\frac{p-p'}{p} = \frac{n}{N}$ aufstellte, wobei n resp. N die in einem ccm Lösung enthaltene Anzahl Mole gelöster Stoff oder Lösungsmittel sind. Diese Formel wird mit der von uns erhaltenen identisch, falls man folgende Umformung vornimmt: $\frac{p-p'}{p} = c\frac{M}{s} = \frac{c}{\frac{s}{M}} = \frac{n}{N}$. Denn es ist $c = n$, da c die in ein ccm Lösung enthaltene Anzahl Mole gelöster Stoff ist; und da s das Gewicht eines ccm Lösungsmittel und M sein Molekulargewicht ist, so ist $\frac{s}{M}$ die Anzahl Mole, die ein ccm Lösungsmittel, mithin bei verdünnten Lösungen, für welche allein das Gesetz gilt, auch ein ccm Lösung enthält, also $\frac{s}{M} = N$. Natürlich ist die Gültigkeit dieser rein empirisch gefundenen Gesetze der beste Beweis für die Richtigkeit der sie erklärenden Grundhypothese, daß der osmotische Druck in verdünnten Lösungen dem entsprechenden Gasdruck gleich ist, und für die Zulässigkeit der Ausdehnung der Avogadroschen Hypothese auf Lösungen. Praktisch zeigt sich die ganze Fruchtbarkeit dieser Theorie erst bei der Behandlung der mit der Dampfspannungserniedrigung und dem osmotischen Druck im engen Zusammenhange stehenden Größen der Siedepunktserhöhung und der Gefrierpunktserniedrigung, deren Messung die experimentell einfachste und genaueste Bestimmung des Molekulargewichts gelöster Stoffe gestattet. Der Zusammenhang der beiden letztgenannten Eigenschaften mit dem osmotischen Drucke folgt ohne weiteres aus ihrer Beziehung zur Dampfspannung.

Beim Siedepunkt ist sofort ersichtlich, daß Lösungen mit gleichem osmotischen Druck in ein und demselben Lösungsmittel auch

den gleichen Siedepunkt haben müssen. Denn ihre Dampfspannungen sind, wie oben bewiesen, gegen die des reinen Lösungsmittels um den gleichen Betrag erniedrigt, sind also einander gleich. Somit sind umgekehrt bei gleichem Druck, z. B. Atmosphärendruck, ihre Siedetemperaturen gleich. Natürlich liegt bei gleichem Druck der Siedepunkt einer Lösung stets höher als der des reinen Lösungsmittels, da ihr Dampfdruck bei gleicher Temperatur kleiner ist. Um ihn ebenfalls gleich dem Außendruck zu machen, muß man die Temperatur der Lösung erhöhen. Um den Betrag dieser Siedepunktserhöhung berechnen zu können, muß man noch die Abhängigkeit der Siedetemperatur vom Druck, mit anderen Worten, die Dampfdruckkurve der Flüssigkeit kennen. Die Thermodynamik lehrt nun, daß für kleine Temperaturintervalle, innerhalb deren man die Verdampfungswärme als konstant ansehen kann, die Erhöhung der Siedetemperatur proportional der Erniedrigung der Dampfspannung und somit wie diese proportional dem osmotischen Druck ist. Es genügt also, für ein bestimmtes Lösungsmittel die Siedepunktserhöhung einer einzigen Lösung, deren Gehalt an gelösten Molekeln bekannt ist, zu bestimmen, um vermittels der oben abgeleiteten Gesetze die Siedepunktserhöhung von Lösungen beliebiger Stoffe und beliebiger Konzentration in diesem Lösungsmittel berechnen zu können. Löse ich z. B. m Gramm Substanz vom Molekulargewicht M in 100 Gramm Lösungsmittel, so ist die hierdurch hervorgerufene Siedepunktserhöhung t proportional der Anzahl gelöster Mole, also $t = E\frac{m}{M}$ (Raoult, van't Hoff), worin E ein für das Lösungsmittel spezifischer Proportionalitätsfaktor, die molekulare Siedepunktserhöhung ist. Und zwar stellt er die Siedepunktserhöhung einer Lösung dar, die ein Mol gelösten Stoff auf 100 Gramm Lösungsmittel enthält, berechnet aus Messungen an verdünnten Lösungen, unter der, natürlich rein rechnerischen, Annahme, daß die einfache Proportionalität zwischen molekularer Konzentration und Siedepunktserhöhung bis zu so hohen Konzentrationen hinauf gelten würde. Beckmann hat einen einfachen viel benutzten Apparat zur Messung der Siedepunktserhöhung konstruiert, der hauptsächlich dazu dient, das Molekulargewicht gelöster Stoffe zu bestimmen. Es ist nun, wie van't Hoff gezeigt hat, sogar möglich, mit Hilfe der Thermodynamik den Wert von E für das einzelne Lösungsmittel zu berechnen, wenn man seine Verdampfungswärme kennt. Für die Abhängigkeit des Dampfdruckes von der Temperatur gilt nämlich nach Clausius die Formel:

$$\ln\frac{p_1}{p_2} = \frac{\lambda}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)$$

worin p_1 und p_2 die zu den absoluten Temperaturen T_1 und T_2 gehörigen Dampfdrucke, λ die Verdampfungswärme eines Moles Flüssigkeit und R die Gaskonstante sind. Hierbei ist Voraussetzung, daß in dem betrachteten Temperaturintervall die Verdampfungswärme konstant gesetzt werden kann, daß für den Dampf die Gasgesetze gelten und sein spezifisches Gewicht klein ist gegen das der Flüssigkeit. Beim Siedepunkt T der Lösung ist nun ihr Dampfdruck gleich dem Atmosphärendruck p_0, während der des reinen Lösungsmittels schon bei dessen Siedepunkt T_0 so groß ist. Sein Dampfdruck p bei der Temperatur T berechnet sich also aus der obigen Formel durch Einsetzen. Es ist

$$\ln\frac{p}{p_0} = \frac{\lambda}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) = \frac{\lambda}{R}\cdot\frac{T-T_0}{T.T_0} = \frac{\lambda}{R}\frac{t}{T_0^2}$$

da $T-T_0$ die Siedepunktserhöhung t der Lösung darstellt und T gleich T_0 gesetzt werden kann, falls wir nun verdünnte Lösungen betrachten. Es besteht nun aber zwischen dem Dampfdruck p_0 der Lösung und p des Lösungsmittels bei derselben Temperatur T nach Raoult, wie oben abgeleitet, die Beziehung $\frac{p-p_0}{p}$ resp. $\ln\frac{p}{p_0} = \frac{n}{N}$. Um E zu berechnen, muß man nun eine Lösung betrachten, die ein Mol gelösten Stoff enthält, also $n = 1$, auf 100 Gramm Lösungsmittel. Ist dessen Molekulargewicht M, so sind 100 Gramm $= \frac{100}{M}$ Mole, also $N = \frac{100}{M}$. Folglich ist $\ln\frac{p}{p_0} = \frac{M}{100}$ für eine Lösung, für welche $t = E$ ist. Dies ergibt eingesetzt: $\frac{M}{100} = \ln\frac{p}{p_0} = \frac{\lambda}{R}\frac{E}{T_0^2}$, also $E = \frac{M}{\lambda}\cdot\frac{RT_0^2}{100}$.

Nun ist aber $\frac{\lambda}{M}$ die molekulare Verdampfungswärme dividiert durch das Molekulargewicht gleich l, der Verdampfungswärme eines Grammes Flüssigkeit. Der Zahlenwert von R ist, falls er ebenso wie l in g-cal. ausgedrückt wird, gleich 2. Also ist $E = \frac{0{,}02\,T_0^2}{l}$. Diese Beziehung ist in einer großen Anzahl von Fällen experimentell aufs beste bestätigt worden. Ist nun der gelöste Stoff ebenfalls merkbar flüchtig, so gelten zwar, wie erwähnt, dieselben einfachen Gesetze für die Erniedrigung des Partialdampfdruckes des Lösungsmittels jedoch nicht für den Siedepunkt. Ist z. B. der Dampfdruck des gelösten Stoffes gerade so groß wie die durch ihn hervorgebrachte Erniedrigung des Dampfdruckes des Lösungs-

mittels, so bleibt in toto der Gesamtdampfdruck und somit auch der Siedepunkt unverändert, ist der Dampfdruck des gelösten Stoffes noch größer, so wird der Siedepunkt sogar erniedrigt. Man muß also in diesem Falle den Dampfdruck des gelösten Stoffes als Funktion seiner Konzentration kennen, wobei man, da es sich um verdünnte Lösungen handelt, das Henry sche Gesetz als gültig annehmen kann.

Gefrierpunkt. Molekulare Gefrierpunktserniedrigung. Eutektischer Punkt. Kryohydrate. Solvate. Nernst'sches Verteilungsgesetz. Lösungswärme. In ganz analoger Weise wie für den Siedepunkt läßt sich auch der Zusammenhang zwischen Gefrierpunkt und osmotischem Druck einer Lösung entwickeln. Wir gehen hierbei wiederum von der Abhängigkeit des Gefrierpunktes vom Dampfdruck aus. Beim Gefrierpunkt des reinen Stoffes befinden sich feste und flüssige Phase im Gleichgewicht, müssen also den gleichen Dampfdruck besitzen. Denn sonst würde eine Destillation von der Phase mit größerem zu der mit kleinerem Dampfdruck stattfinden, und erstere würde verschwinden. Aus demselben Grunde muß unterhalb der Gefriertemperatur, wo nur der feste Aggregatzustand stabil ist, dieser den kleineren Dampfdruck haben, oberhalb dagegen der flüssige Aggregatzustand. Die Dampfdruckkurve eines Stoffes als Funktion der Temperatur verläuft daher in der Umgebung des Schmelzpunktes so, wie es die ausgezogenen Linien in Figur 8 zeigen, und besitzt beim Schmelz-

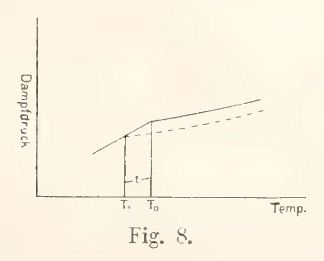


Fig. 8.

punkt selbst einen scharfen Knick. Beim Gefrierpunkt einer Lösung nun muß sich diese ebenfalls im Gleichgewicht mit dem festen Lösungsmittel befinden, falls reines Lösungsmittel ausfriert, was meistens der Fall ist, und worauf wir uns vorläufig beschränken wollen. Es muß dann beim Gefrierpunkt der Dampfdruck der Lösung gleich dem des festen Stoffes sein. Nun besitzt die Lösung stets einen niedrigeren Dampfdruck als die reine Flüssigkeit. Ihre Dampfdruckkurve wird also, wie in Figur 8 durch die punktierte Linie angegeben, stets unter der des reinen Lösungsmittels verlaufen und wird daher die Dampfdruckkurve des festen Stoffes auch bei einer niedrigeren Temperatur als dem Schmelzpunkt des reinen Stoffes schneiden. Zugleich ist auch ohne weiteres ersichtlich, daß Lösungen gleichen osmotischen Druckes, deren Dampfspannung gegenüber der der reinen Flüssigkeit um gleichviel erniedrigt ist, die Dampfdruckkurve des festen Lösungsmittels in demselben Punkte schneiden. Isotonische Lösungen desselben Lösungsmittels besitzen also den gleichen Gefrierpunkt. Die Thermodynamik lehrt nun, daß genau wie die Erhöhung des Siedepunktes auch die Erniedrigung des Gefrierpunktes proportional der Erniedrigung des Dampfdruckes, also proportional dem osmotischen Drucke resp. der molekularen Konzentration des gelösten Stoffes ist, falls man die Schmelzwärme in dem betrachteten kleinen Temperaturintervalle konstant setzt. Es gilt auch hier die Gleichung $t = E\frac{m}{M}$, wobei t die Erniedrigung des Gefrierpunktes ist, und E eine für das Lösungsmittel spezifische Konstante, welche die molekulare Schmelzpunktserniedrigung für ein Mol gelösten Stoff auf 100 Gramm Lösungsmittel darstellt. E läßt sich aus der Schmelzwärme nach der Formel $E = \frac{0{,}02 T_0^2}{w}$ berechnen, wobei T_0 den Schmelzpunkt und w die Schmelzwärme für 1 Gramm Lösungsmittel darstellt. Die Gleichung läßt sich thermodynamisch in ganz analoger Weise wie diejenige für die molekulare Siedepunktserhöhung ableiten und ist experimentell in zahlreichen Fällen geprüft und bestätigt worden. Beckmann hat auch für die Bestimmung der Schmelzpunktserniedrigung einen handlichen Apparat konstruiert, der im Laboratorium zur Bestimmung des Molekulargewichtes gelöster Stoffe vielfach Anwendung findet. Historisch ist noch zu erwähnen, daß die Proportionalität zwischen Konzentration und Gefrierpunktserniedrigung zuerst von Blagden experimentell gefunden worden ist, und daß Raoult, ebenfalls experimentell, fand, daß äquimolekulare Lösungen verschiedener Stoffe in demselben Lösungsmittel den Gefrierpunkt gleich stark erniedrigen, während wir die theoretische Ableitung dieser Gesetze sowie die Berechnung von E aus der Schmelzwärme wieder van't Hoff verdanken.

Es ist nun von Interesse, den Vorgang des Ausfrierens des Lösungsmittels aus einer Lösung näher zu betrachten. Wir nehmen z. B. eine verdünnte Lösung von Kochsalz in Wasser und kühlen diese bis zu ihrem Gefrierpunkt ab. Dann fällt Eis aus, die Lösung wird konzentrierter und der Gefrierpunkt sinkt. Kühlen wir nun immer weiter

ab, so fällt immer mehr Eis aus, die Lösung wird immer konzentrierter und der Gefrierpunkt sinkt ständig, wenn auch nicht mehr proportional der Konzentration, falls die Lösung nicht mehr den Gesetzen der verdünnten Lösungen folgt. Schließlich kommen wir zu einem Punkte, der in unserem Falle bei —21 Grad liegt, an dem die Lösung bei der jetzt erreichten Temperatur an Kochsalz gesättigt ist. Bei weiterer Abkühlung muß dann neben Eis auch Kochsalz ausfallen, da die Lösung ihre Konzentration nicht mehr erhöhen kann, sondern behalten muß. Aus diesem Grunde muß auch der Gefrierpunkt konstant bleiben und kann nicht weiter sinken. Ebenso muß das ausgeschiedene Gemenge dieselbe Zusammensetzung haben wie die Lösung, da sich ja sonst deren Konzentration beim Ausfrieren ändern würde. Man nennt diesen Temperaturpunkt den eutektischen Punkt und das Gemisch mit diesem Gefrierpunkt eutektisches Gemisch. Wie man sieht, verhält sich ein solches Gemisch beim Gefrieren völlig wie ein einheitlicher Körper, indem es bei konstanter Temperatur, ohne seine Zusammensetzung zu ändern, fest wird. Man glaubte deshalb früher, daß hier wirklich ein einheitlicher Körper, ein sogenanntes Kryohydrat, vorliegt, nämlich eine Verbindung zwischen gelöstem Stoff und Lösungsmittel, deren Zusammensetzung gerade der des eutektischen Gemisches entspricht. Daß dies nicht der Fall ist, erkennt man schon daraus, daß diese Zusammensetzung im allgemeinen durchaus keine einfachen stöchiometrischen Verhältnisse zeigt, noch einwandsfreier aber mit Hilfe der mikroskopischen Untersuchung des ausgefrorenen Anteils, die beweist, daß hier ein mechanisches Gemenge beider Bestandteile vorliegt.

Wir können auch auf einem zweiten Wege zum eutektischen Punkte gelangen, indem wir von einer z. B. bei Zimmertemperatur gesättigten Kochsalzlösung ausgehen. Kühlen wir diese ab, so wird Kochsalz ausfallen, da

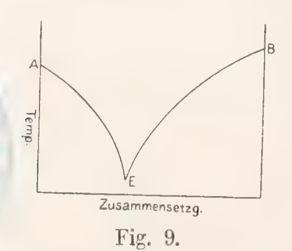


Fig. 9.

seine Löslichkeit mit sinkender Temperatur abnimmt, und die Lösung wird immer verdünnter werden. Bei stetigem Abkühlen werden wir hier schließlich ebenso zu dem Punkte gelangen, bei dem sich zugleich mit dem Kochsalz auch Eis ausscheidet, der also mit dem eutektischem Punkte identisch ist. Dieser kann daher, wie Figur 9 zeigt, als der Schnittpunkt der Kurve A E, die die Abhängigkeit der Gefriertemperatur der Kochsalzlösung von der Konzentration darstellt, mit der Kurve B E, die die Abhängigkeit der Löslichkeit des Kochsalzes in Wasser von der Temperatur darstellt, aufgefaßt werden. Man kann an diesem Beispiel auch erkennen, wie willkürlich die Unterscheidung der Bestandteile einer Lösung in gelösten Stoff und Lösungsmittel ist. Denn man kann mit demselben Rechte die Kurve A E als Löslichkeitskurve des Eises in Kochsalz, und BE als Kurve der Schmelzpunktserniedrigung von Kochsalz durch Wasser auffassen. Ganz allgemein wird also, wenn ich die Schmelzpunkte der Gemische zweier Stoffe A und B, z. B. zweier Metalle, als Funktion der Zusammensetzung auftrage, die Kurve die obige Gestalt haben, indem der Schmelzpunkt eines jeden Stoffes durch den wachsenden Zusatz des anderen immer mehr erniedrigt wird, bis sich die beiden Kurven im eutektischen Punkte schneiden. Bilden nun die beiden Stoffe eine Verbindung miteinander, so gestalten sich die Verhältnisse folgendermaßen. Wir nehmen zuerst an, daß die Verbindung AB nicht merklich dissoziiert. d. h. in ihre Komponenten A und B gespalten ist. Dann wird sich AB vollständig wie ein selbständiger einheitlicher Stoff verhalten, und die Kurve wird das Aussehen wie in Figur 10 zeigen.

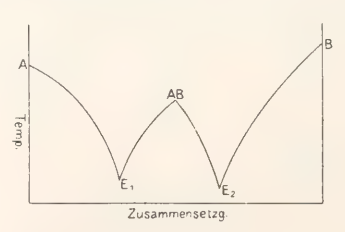


Fig. 10.

Hier ist AB der Schmelzpunkt der reinen Verbindung, der einer Zusammensetzung von ein Mol A auf ein Mol B entspricht, ein Maximum und zwar ein scharfer Knickpunkt, da geringe Zusätze sowohl von A wie von B eine der zugesetzten Menge proportionale Gefrierpunktserniedrigung hervorbringen. E_1 und E_2 sind die eutektischen Punkte von A mit AB und von AB mit B, wobei auf der Kurve E_1ABE_2 die Verbindung AB Bodenkörper ist. Etwas anders sieht die Kurve aus, wenn die Verbindung AB zum Teil in A und B gespalten ist (s. Figur 11). Auch hier zeigt die Kurve zwei eutektische Punkte und ein Maximum an derselben Stelle wie in Figur 10, dieses ist aber abgeflacht. Denn setze ich jetzt zu dem Gemische, das ein Mol A auf ein

Mol B enthält, z. B. etwas A hinzu, so ist die Gefrierpunktserniedrigung nicht mehr proportional der hinzugefügten Menge. Nach dem Massenwirkungsgesetze (vgl. den Artikel „Chemische Kinetik") wird vielmehr ein Teil von A zur Bildung der Verbindung AB, also Lösungsmittel, verbraucht, so daß die Gefrierpunktserniedrigung viel

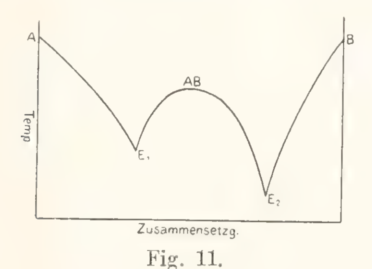


Fig. 11.

kleiner ausfällt. Ganz ebenso liegen die Verhältnisse für den allgemeinen Fall, daß die Verbindung die Formel A_mB_n hat, nur daß dann das Maximum an einer anderen Stelle liegt. Die Aufnahme dieser Schmelzkurve von 2 Stoffen gibt uns ein Mittel, um sicher festzustellen, daß ein Stoff bei seiner Auflösung in einem anderen mit diesem eine Verbindung eingeht, aber nur, falls diese Verbindung auch als feste Phase auftritt. Es ist zugleich die einzige sichere Methode, die wir hierfür besitzen. Denn z. B. bei der Messung des osmotischen Druckes einer Lösung auf direktem oder indirektem Wege können wir ja immer nur die Zahl der gelösten Molekeln bestimmen, ohne Rücksicht auf ihre chemische Natur. Es ist nun sehr wohl möglich, daß die Molekeln des gelösten Stoffes sich mit denen des Lösungsmittels zu sogenannten Solvaten, bei Wasser Hydrate genannt, verbunden haben. Dies wird sogar in einigen Fällen durch verschiedene Tatsachen sehr wahrscheinlich gemacht, so z. B. durch das Auskristallisieren vieler Salze mit Kristallwasser. Dagegen ist es uns unmöglich, wie dies mehrfach versucht worden ist, z. B. aus Gefrierpunktsmessungen an verdünnten Lösungen die Existenz von Hydraten zu beweisen. In den meisten Fällen sind wir in diesem Punkt namentlich in quantitativer Hinsicht völlig im Unklaren.

Das bisher über das Gefrieren von Gemischen Gesagte galt stets nur für den Fall, daß das reine Lösungsmittel ausfriert. Fällt dagegen eine feste Lösung (s. Abschnitt 7c) aus, so wird der Gefrierpunkt weniger erniedrigt. Denn dann wird auch der Dampfdruck des festen Lösungsmittels durch den gelösten Stoff erniedrigt. Es kann in diesem Falle unter Umständen der Gefrierpunkt sogar erhöht werden.

Die hier entwickelten Gesetzmäßigkeiten sind auch praktisch für eine häufig benutzte Trennungsmethode, die fraktionierte Kristallisation, von Wichtigkeit. Man geht dabei analog wie bei der fraktionierten Destillation vor, doch sind die Verhältnisse bei dieser einfacher, weil in jedem Falle nur eine Dampfphase vorhanden ist, während aus einer Lösung verschiedene feste Körper nebeneinander ausfallen können. Die Theorie der fraktionierten Kristallisation ist deshalb auch nicht so weit entwickelt wie die der Destillation. Für den Fall, daß nur eine feste Phase vorliegt, daß also z. B. zwei Salze, die Mischkristalle (s. 7 c) bilden, aus einer Lösung ausfrieren, muß man die Zusammensetzung der gesättigten Lösung in ihrer Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Mischkristalle kennen; dann kann man, ganz wie bei der Destillation, beurteilen, ob eine Trennung durch fraktionierte Kristallisation möglich ist. Daß dieses Verfahren unter Umständen äußerst mühsam ist, zeigt das Beispiel des Radiumbromids, das man vom Bariumbromid nur durch mehrere tausend aufeinander folgende Kristallisationen trennen kann.

Eine weitere Gesetzmäßigkeit, die aus dem einfachen Gesetze für den osmotischen Druck verdünnter Lösungen folgt, ist der Nernstsche Verteilungssatz, eine Verallgemeinerung des für die Gase geltenden Henryschen Gesetzes. Der Nernstsche Verteilungssatz besagt, daß nicht nur für ein Gas, das sich zwischen gasförmiger und flüssiger Phase verteilt, sondern ganz allgemein für jeden Stoff, auch eine Flüssigkeit oder einen festen Körper, der sich zwischen zwei Phasen, ebenfalls von beliebigem Aggregatzustand, verteilt, das Verhältnis der Konzentrationen in den beiden Phasen, der Verteilungskoeffizient, konstant ist, falls diese als verdünnte Lösungen angesehen werden können. Dieses Gesetz läßt sich mit Hilfe des zweiten Hauptsatzes ableiten, wenn man annimmt, daß der osmotische Druck des gelösten Stoffes dem entsprechenden Gasdruck proportional ist, gilt also nur, soweit diese Voraussetzung erfüllt ist. Die beiden Phasen können z. B. zwei beschränkt mischbare Flüssigkeiten, wie Wasser und Schwefelkohlenstoff, sein, in denen ein dritter Stoff, z. B. Jod, gelöst ist. Im vorliegenden Falle ist dann die Konzentration des Jods im Schwefelkohlenstoff bei Zimmertemperatur stets 410 mal so groß als im Wasser. Es kann aber auch eine Phase fest und eine flüssig sein, wofür als Beispiel die Verteilung von Jod zwischen flüssigem und festem Benzol erwähnt sei. In einfacher Weise läßt sich der Verteilungskoeffizient eines Stoffes zwischen zwei nicht merkbar mischbaren Flüssigkeiten berechnen. Er ist nämlich gleich dem Verhältnis der Konzentrationen der an dem

betreffenden Stoffe gesättigten Lösungen, falls diese noch als verdünnte Lösungen angesehen werden können. Es folgt dies daraus, daß beide gesättigte Lösungen mit demselben Bodenkörper, also auch untereinander im Gleichgewicht sind. Voraussetzung für die Gültigkeit des Nernst schen Verteilungssatzes ist, daß der gelöste Stoff in beiden Phasen wirklich identisch ist, also auch die gleiche Molekulargröße besitzt. Bildet der Stoff in einer der beiden Lösungen Doppelmolekeln, wie z. B. Benzoesäure, die in Benzol das doppelte, in Wasser das einfache Molekulargewicht hat, dann gilt das Gesetz nicht mehr in der einfachen Form, sondern für jede der verschiedenen Molekelarten einzeln.

Hierhin gehört ferner das ebenfalls von Nernst gefundene Gesetz der Löslichkeitserniedrigung. Löse ich in einem Stoffe, z. B. Aether, der in einem zweiten, z. B. Wasser, beschränkt löslich ist, einen dritten auf, der im Wasser unlöslich ist, so wird die Löslichkeit des Aethers im Wasser erniedrigt. Denn der Dampfdruck des Aethers wird durch den Zusatz eines fremden Stoffes erniedrigt, also wird nach dem Henry schen Gesetz auch die Löslichkeit des Aetherdampfes in Wasser, die ja gleich der des flüssigen Aethers sein muß, kleiner.

Von allgemeinen Eigenschaften der Lösungen fester Stoffe in Flüssigkeiten ist schließlich noch die Lösungswärme zu erwähnen. Man unterscheidet je nach den Bedingungen, unter denen man die Auflösung vor sich gehen läßt, verschiedene Lösungswärmen. Die beiden wichtigsten sind die Wärmemengen, die beim Auflösen eines Stoffes entweder zu seiner gesättigten Lösung oder zu einer sehr verdünnten Lösung, also in sehr viel Lösungsmittel, entwickelt werden. Letztere ist um den Betrag der Verdünnungswärme größer als erstere. Man rechnet gewöhnlich mit der Wärmemenge, die beim Auflösen von ein Mol Substanz frei wird, der molekularen Lösungswärme. Die Lösungswärme fester Körper ist meist negativ, d. h. es wird bei der Auflösung Wärme gebunden. Wo dies nicht der Fall ist, sondern sogar starke Wärmeentwicklung stattfindet, wie z. B. beim Auflösen von Kaliumhydroxyd in Wasser, ist dies meist auf das Stattfinden einer chemischen Reaktion zu schieben. Aus der Lösungswärme kann man, wie dies schon bei den Gasen erwähnt wurde, mit Hilfe des Prinzips von Le Chatelier-Braun Schlüsse auf den Temperaturkoeffizienten der Löslichkeit ziehen. Wird Wärme aufgenommen, so wird die Löslichkeit mit steigender Temperatur größer, im umgekehrten Fall kleiner. Für schwer lösliche Stoffe, deren gesättigte Lösungen als verdünnte betrachtet werden können, hat van't Hoff den Zusammenhang quantitativ durch die Formel ausgedrückt $Q = T\frac{dP}{dT}(V-v)$, worin V resp. v das Volumen ist, das ein Mol des gelösten Stoffes als gesättigte Lösung, resp. in reinem Zustand einnimmt, P der osmotische Druck der gesättigten Lösung und Q die Wärmemenge, die beim Auflösen eines Mols in einer nahezu gesättigten Lösung absorbiert wird.

β) Elektrolytlösungen. Die wichtigste und interessanteste Klasse der Lösungen ist die der Elektrolytlösungen. Die Grundeigenschaft, durch die sie sich von den übrigen Lösungen unterscheiden, ist ihre Fähigkeit, den elektrischen Strom zu leiten. Es sind dies die Lösungen der Salze, Säuren und Basen, der Elektrolyte, hauptsächlich in Wasser, aber auch in einigen organischen Lösungsmitteln. Schon früher (Grotthus, Clausius) hatte man diese Fähigkeit so zu erklären versucht, daß man annahm, die gelösten Moleküle seien zum Teil in ihre elektrisch geladenen Bestandteile, die Ionen, zerfallen. Doch wußte man nichts Näheres über Art und Grad dieser Dissoziation, und erst Arrhenius, der Schöpfer der elektrolytischen Dissoziationstheorie, brachte Licht in diese Verhältnisse, indem er die Zahl der in der Lösung vorhandenen Ionen vermittels der im vorigen Abschnitt besprochenen Raoult-van't Hoff schen Methoden feststellte und sie zur elektrischen Leitfähigkeit in Beziehung setzte. Im folgenden sollen im einzelnen die durch diese Theorie erklärten Eigenschaften der Elektrolytlösungen besprochen werden.

Osmotischer Druck. Das Fundament der ganzen Theorie bilden die Ergebnisse der Messungen des osmotischen Druckes dieser Lösungen, meist mit Hilfe von Gefrierpunktsmessungen ausgeführt. Es hatte sich schon früher bei der Prüfung der van't Hoff schen Gesetze durch das Experiment herausgestellt, daß Salze, Säuren und Basen in wässerigen Lösungen ein kleineres Molekulargewicht zeigten, als nach der chemischen Formel zu erwarten war. In sehr verdünnten Lösungen betrug das Molekulargewicht meist nur die Hälfte, manchmal noch weniger des zu erwartenden Wertes. Van't Hoff führte deshalb einen Faktor i ein, mit dem man das gefundene Molekulargewicht multiplizieren mußte, um den theoretischen Wert zu erhalten. Arrhenius' Theorie verwandelte nun diesen scheinbaren Widerspruch gegen die Theorie der verdünnten Lösungen in eine glänzende Bestätigung. Er nahm an, daß ein bestimmter Bruchteil des gelösten Stoffes in entgegengesetzt geladene Ionen zerfallen sei, z. B. $NaCl = Na^{\cdot} + Cl'$, wobei $^{\cdot}$ eine positive $'$ eine negative Ladung bedeutet. Man spricht in diesem Falle von einem binären Elektrolyten, wenn der Elektrolyt in 3 Ionen zerfällt, von einem ternären usw. Ist von einem Mol Salz der Bruchteil α in je 2 Ionen

zerfallen, so beträgt der undissoziierte Anteil $(1-\alpha)$ Mol, der dissoziierte liefert bei einem binären Elektrolyten 2α Mol, im ganzen sind daher in der Lösung $(1-\alpha+2\alpha) = (1+\alpha)$ Mol gelöster Stoff vorhanden. Da man also die Zahl der gelösten Mole um $(1+\alpha)$mal zu groß findet, muß das Molekulargewicht, das man durch Division der Menge gelöster Substanz durch Zahl der Mole findet, um $(1+\alpha)$mal zu klein erscheinen. Dies ist nach Arrhenius die Bedeutung des Faktors i.

Leitfähigkeit. Man kann nun aber den Dissoziationsgrad α noch auf andere Weise bestimmen, nämlich aus der Leitfähigkeit. Nach Arrhenius und Kohlrausch besteht der Vorgang der elektrischen Leitung in einer Elektrolytlösung darin, daß sich die Ionen, also mit einer elektrischen Ladung versehene materielle Teilchen, unter dem Einfluß der wirkenden elektromotorischen Kräfte fortbewegen und somit den elektrischen Strom selbst darstellen. Man erkennt hieraus ohne weiteres, daß, da nach dem Faradayschen Gesetz ein Aequivalent eines beliebigen Ions stets die gleiche Elektrizitätsmenge (96540 Coulombs) trägt, die Leitfähigkeit proportional der Anzahl der vorhandenen Ionen ist. Diese hängt einerseits von der Konzentration η des Elektrolyten ab, die man hier in Aequivalenten pro 1 ccm zu zählen pflegt, andererseits von seinem Dissoziationsgrade α. Um den Einfluß der Konzentration zu eliminieren, betrachtet man nicht die spezifische Leitfähigkeit $\varkappa$, die die Stromstärke angibt, die in 1 ccm Lösung zwischen zwei Elektroden von je 1 qcm Oberfläche mit einem Abstand von 1 cm unter dem Einfluß einer Potentialdifferenz von 1 Volt herrscht, sondern die molekulare Leitfähigkeit $\Lambda = \frac{\varkappa}{\eta}$. Es wird dadurch erreicht, daß man stets die von einem Aequivalent Elektrolyt transportierten Elektrizitätsmengen vergleicht, die also direkt der in diesem Mol enthaltenen Anzahl Ionen, d. h. dem Dissoziationsgrade proportional sind, also $\Lambda \sim \alpha$. Es zeigt sich nun, daß die molekulare Leitfähigkeit mit wachsender Verdünnung zunimmt und sich unbegrenzt einem Maximalwert nähert. Dieser wird erreicht, wenn der gesamte vorhandene Elektrolyt am Stromtransport teilnimmt und in Ionen zerfallen ist. Es ist dann $\alpha = 1$, und nennt man den Grenzwert, den die molekulare Leitfähigkeit hierbei annimmt, $\Lambda\infty$, so ist $\alpha = \frac{\Lambda}{\Lambda\infty}$. Die auf diesem Wege experimentell gefundenen Werte für α stimmen mit den durch Gefrierpunktsmessungen erhaltenen gut überein.

Ostwald'sches Verdünnungsgesetz. Dissoziationskonstante. Die Abhängigkeit des Dissoziationsgrades von der Konzentration läßt sich, wie Ostwald gezeigt hat, durch ein einfaches Gesetz, das Ostwaldsche Verdünnungsgesetz, ausdrücken, welches aus der Anwendung des Massenwirkungsgesetzes auf den Vorgang der Dissoziation folgt. Das Massenwirkungsgesetz für eine Reaktion vom Typus $A + B = AB$ lautet $\frac{[A][B]}{[AB]} =$ konst., wobei [A] usw. Konzentration von A usw. bedeutet. Dieses Gesetz gilt für Gase und verdünnte Lösungen, wenn der Gasdruck resp. der osmotische Druck der Konzentration der reagierenden Stoffe proportional ist, wie sich thermodynamisch streng zeigen läßt. Betrachtet man nun eine Lösung von Volumen v, die ein Mol eines Elektrolyten AB, der in die Ionen $A^{\cdot}$ und B' dissoziiert ist, enthält, so gilt nach dem Massenwirkungsgesetz die Gleichung $\frac{[A^{\cdot}][B']}{[AB]} =$ konst. Nun ist für den Dissoziationsgrad α die Konzentration des undissoziierten Anteils [AB] $= \frac{1-\alpha}{v}$, die der Ionen $[A^{\cdot}] = [B'] = \frac{\alpha}{v}$.

Also $\frac{\frac{\alpha^2}{v^2}}{\frac{1-\alpha}{v}} = \frac{\alpha^2}{(1-\alpha)v} = k$. k heißt die Dissoziationskonstante des Elektrolyten. Dieses Gesetz wurde durch zahlreiche Messungen bestätigt. Eine Ausnahme machen jedoch die starken Elektrolyte, die Stoffe mit großer Dissoziationskonstante, für die aus noch nicht aufgeklärten Gründen die einfachen Lösungsgesetze nicht gelten. Durch die experimentelle Bestimmung der Dissoziationskonstante haben wir ein Mittel, die Ionisierungstendenz eines Elektrolyten zahlenmäßig auszudrücken.

Dissoziierende Kraft der Lösungsmittel. Beziehungen zur Dielektrizitätskonstante. Die Größe der Dissoziationskonstante hängt außer von dem Elektrolyten sehr von der Natur des Lösungsmittels ab. Von allen gewöhnlichen Lösungsmitteln zeigt das Wasser bei weitem die größte dissoziierende Kraft, während von organischen Lösungsmitteln nur wenige überhaupt die Fähigkeit haben Elektrolyte zu dissoziieren. Wie Nernst und Thomson gezeigt haben, hängt die dissoziierende Kraft eines Lösungsmittels aufs engste mit seiner Dielektrizitätskonstante zusammen. Bekanntlich gibt diese Konstante an, um wieviel geringer in dem betreffenden Medium die Kraft ist, mit der sich zwei ungleichnamige elektrische Ladungen anziehen, als im Vakuum bei gleichem Abstande. Es ist also klar, daß die Kraft, mit der sich die entgegengesetzt ge-

ladenen Ionen wieder zu vereinigen streben, um so geringer ist, die Dissoziation also um so größer, je größer die Dielektrizitätskonstante eines Lösungsmittels ist. Hiermit stimmt die außergewöhnlich hohe Dielektrizitätskonstante des Wassers (81) aufs beste überein, und auch bei den anderen Lösungsmitteln konnte im allgemeinen ein Parallelgehen von Dielektrizitätskonstante und dissoziierender Kraft beobachtet werden. Es scheint jedoch zweifellos, daß die chemische Natur des Lösungsmittels hier noch eine besondere Rolle spielt, so daß z. B. die Lösungsmittel, welche selbst assoziieren, d. h. Molekülkomplexe bilden, eine besonders starke dissoziierende Kraft besitzen.

Neutrale, saure, basische Lösungen. Die elektrolytische Dissoziationstheorie wirft nun auf eine Reihe von Eigenschaften der Lösungen Licht, über die früher vollständige Unklarheit herrschte. So unterscheidet man bekanntlich saure, basische und neutrale Lösungen. Die charakteristischen Eigenschaften der sauren Lösungen sind, daß sie sauer schmecken, blaues Lackmus röten, Marmor und viele Metalle auflösen usw., die der basischen Lösungen, daß sie rotes Lackmus bläuen, Ester stark verseifen usw. Säuren vernichten die charakteristischen Eigenschaften der Basen (und umgekehrt) und verbinden sich mit ihnen zu Salz und Wasser, welchen Vorgang man als Neutralisation bezeichnet. Während nun früher die exakte Definition der sauren und basischen Eigenschaft einer Lösung große Schwierigkeiten bereitete, ist dies jetzt leicht. Nach der Ionentheorie sind nämlich die charakteristischen Eigenschaften der Säuren den Wirkungen des $H^{\cdot}$, die der Basen denen des OH' zuzuschreiben. Der „Säuregrad“, die Acidität, einer Lösung ist quantitativ bestimmt durch ihren Gehalt an $H^{\cdot}$, ebenso die Basizität durch den an OH'. Das Maß für die Stärke einer Säure oder Base ist demnach die Größe ihrer Dissoziationskonstante.

Isohydrische Lösungen. Auch die Frage, was beim Vermischen zweier Elektrolytlösungen geschieht, läßt sich leicht beantworten, wenn man die Dissoziationskonstanten der in Betracht kommenden Stoffe und ihre Löslichkeiten kennt. Es sei hier nur auf die isohydrischen Lösungen eingegangen, welche die Eigentümlichkeit zeigen, daß sich beim Vermischen der Dissoziationsgrad der gelösten Elektrolyte nicht ändert. Es ist dies dann der Fall, wenn sie ein gemeinschaftliches Ion in gleicher Konzentration besitzen. Gilt z. B. für den Elektrolyten AB die Dissoziationsgleichung $\frac{[A^{\cdot}][B']}{[A\,B]} = k$ und fügt man zu einer Lösung desselben die eines anderen Elektrolyten, die das $A^{\cdot}$ in gleicher Konzentration enthält, so wird dessen Konzentration gar nicht geändert, d. h. $[A^{\cdot}]$ bleibt konstant. B' und AB aber werden in gleichem Maße verdünnt, so daß sich der Einfluß der Konzentrationsänderung in der Gleichung heraushebt, und der Dissoziationsgrad derselbe bleibt.

Additive Eigenschaften. Ein besonders einfaches Verhalten zeigen die Eigenschaften verdünnter Lösungen von starken Elektrolyten, bei denen fast der gesamte gelöste Stoff in seine Ionen gespalten ist. Man kann in diesem Falle die Eigenschaften als Summe der einer jeden Ionenart einzeln zukommenden Eigenschaften auffassen, die Lösungen zeigen, wie man sagt, ein additives Verhalten. Besonders eingehend sind die molekularen Leitfähigkeiten solcher Lösungen studiert worden, die oben mit Λ_∞ bezeichnet wurden. Es hat sich hier, hauptsächlich an den Messungen von Kohlrausch, das Gesetz bestätigen lassen, daß für jeden Elektrolyten Λ_∞ gleich der Summe der Λ_∞ seiner einzelnen Ionen ist. Bilde ich z. B. die Differenz der Λ_∞ einerseits für KCl und KBr, andererseits für NaCl und NaBr, so sind die beiden Differenzen gleich, und zwar gleich der Differenz der Leitfähigkeiten von Cl' und Br'. Es ist dies praktisch von Bedeutung, weil man auf diese Weise das Λ_∞ schwacher Elektrolyte, das man direkt wegen der Kleinheit der spezifischen Leitfähigkeit beim Grenzwert von Λ nicht mehr messen kann, berechnen kann, indem man die Λ_∞ starker Elektrolyte, die je 1 seiner Ionen enthalten, mißt. So kann man z. B. das Λ_∞ der schwach dissoziierten Essigsäure aus den Λ_∞ der starken Elektrolyte HCl, KCl und KAc berechnen. Das gleiche additive Verhalten zeigen auch die anderen Eigenschaften der Salzlösungen, wie Dichte, Lichtbrechung, Absorption usw., wie durch viele Experimentaluntersuchungen bestätigt worden ist.

Löslichkeitsprodukt. Löslichkeitsbeeinflussung. Ueber die Beeinflussung der Löslichkeit der Elektrolyte durch gleichionige Salze gibt die Theorie ebenfalls Aufklärung. Für eine Lösung, die an einem bestimmten Elektrolyten gesättigt ist, ist die Konzentration seines undissoziierten Anteils eine Konstante. Ich kann also bei Anwendung des Ostwaldschen Verdünnungsgesetzes $\frac{[A^{\cdot}][B']}{[A\,B]} = k$ schreiben: $[A^{\cdot}].[B'] = k.[AB] = L$, d. h. es ist das Produkt der beiden Ionenkonzentrationen, das sogenannte Löslichkeitsprodukt, eine Konstante. Ist nun der Elektrolyt schwer löslich, so ist er in der sehr verdünnten Lösung als völlig dissoziiert anzusehen, so daß die Konzentration eines jeden Ions gleich der analytisch bestimmten Konzentration l der gesättigten Lösung ist. Dann

wird $[A^{\cdot}].[B'] = L = l^2$, d. h. das Löslichkeitsprodukt ist gleich dem Quadrate der Löslichkeit. Man kann die Löslichkeit eines solchen Elektrolyten durch Zusatz eines anderen, der ein Ion mit ihm gemeinsam hat, beliebig herabdrücken. Denn setze ich zu AB einen leicht löslichen starken Elektrolyten der ebenfalls $A^{\cdot}$ abspaltet, so wird $[A^{\cdot}]$ sehr groß, also muß, da $[A^{\cdot}].[B'] = L$, $[B']$ sehr klein werden. Dies ist nur dadurch möglich, daß sich ein Teil der $A^{\cdot}$ mit B' zu undissoziierten AB verbindet und, da die Lösung an diesem gesättigt ist, ausfällt. Man macht hiervon in der analytischen Chemie vielfach Gebrauch. Als Beispiel sei die Ausfällung der Metallsulfide erwähnt. Der Schwefelwasserstoff ist eine sehr schwache Säure, und seine bei Atmosphärendruck gesättigte Lösung enthält nur wenig S''. Mache ich die Lösung nun stark sauer, steigere also die Wasserstoffionenkonzentration sehr stark, so wird die Konzentration der Schwefelionen noch stark verkleinert, so daß nur die Metallsulfide mit ganz unmeßbar kleinem Löslichkeitsprodukt ausfallen. Mache ich die Lösung nur ganz schwach sauer, so ist die Schwefelionenkonzentration schon größer und es fallen auch Metalle mit etwas größerem Löslichkeitsprodukt aus. Mache ich aber die Lösung alkalisch, so wird die Wasserstoffionenkonzentration stark verkleinert, also die der S'' stark vergrößert, und es wird das Löslichkeitsprodukt selbst ziemlich löslicher Metallsulfide erreicht, so daß nur noch die ganz leicht löslichen in der Lösung bleiben. Andererseits kann man die Löslichkeit eines schwer löslichen Elektrolyten stark erhöhen, indem man die Konzentration eines seiner Ionen erniedrigt. Dies kann z. B. dadurch geschehen, daß man einen Stoff hinzufügt, der mit einem der Ionen unter Bildung einer Verbindung, eines sogenannten komplexen Ions reagiert. Dann wird die Konzentration des hierzu verbrauchten Ions verkleinert, die Konzentration des anderen muß also erhöht werden, und dies kann nur dadurch geschehen, daß undissoziierter Stoff sich spaltet und Bodenkörper in die Lösung geht, damit diese gesättigt bleibt. Als Beispiel sei die Löslichkeit des schwer löslichen AgCl in Lösung von Ammoniak angeführt, das mit dem Silber Komplexionen bildet.

Lösungen von Doppelsalzen. Eine gewisse Analogie zur Ionenspaltung zeigt der Fall der Lösung von Doppelsalzen, die in der Lösung in ihre Bestandteile dissoziieren, nur daß hier auch die Dissoziationsprodukte als Bodenkörper auftreten können. Wir wollen als Beispiel den von van 't Hoff untersuchten Fall des Blödits, eines Doppelsalzes aus Natriumsulfat und Magnesiumsulfat, wählen. Unterhalb 21,5° gehört zu jeder Temperatur eine Lösung, die an den beiden Sulfaten gesättigt und mit ihnen als Bodenkörpern im Gleichgewicht ist, während der in der Lösung gebildete Blödit seine Sättigungskonzentration noch nicht erreicht hat. Dies ist erst bei 21,5° der Fall. Bei dieser Temperatur ist die Lösung mit dem festen Doppelsalz und den festen Komponenten im Gleichgewicht. Oberhalb aber ist die an den beiden Sulfaten gesättigte Lösung an Blödit übersättigt; dieser fällt also aus, und die festen Sulfate werden sich so lange auflösen und als Doppelsalz ausfallen, bis als Bodenkörper nur noch Blödit vorhanden ist. Die Temperatur von 21,5° ist also ein Umwandlungspunkt. Oberhalb desselben ist in Berührung mit gesättigter Lösung nur das Doppelsalz in festem Zustande stabil, unterhalb die Komponenten.

7c) In festen Körpern. Feste Lösungen. Isomorphie. Daß es überhaupt feste Lösungen gibt, ist erst durch van 't Hoffs Theorie der Lösungen klar gestellt worden. Als solche feste Lösungen sind die Mischkristalle aufzufassen. Es gelten für verdünnte feste Lösungen die gleichen einfachen Gesetze wie für flüssige Lösungen, insbesondere also das Grundgesetz, daß der osmotische Druck des gelösten Stoffes dem entsprechenden Gasdrucke proportional ist. Man kann das in diesem Fall natürlich nicht durch direkte Messung des osmotischen Druckes beweisen. Man hat aber die Folgerungen hieraus, besonders den Nernstschen Verteilungssatz, vielfach experimentell bestätigt. Die Mischbarkeit der Stoffe im festen Aggregatzustand ist natürlich viel beschränkter als im flüssigen oder gar gasförmigen. Es finden sich aber alle Grade von unmerklicher bis zu unbegrenzter Mischbarkeit vertreten. Während man früher glaubte, daß nur chemisch ähnliche Stoffe mit gleicher Kristallform (Isomorphie) sich mischen können, hat man jetzt mehrere Beispiele gefunden, wo dies nicht der Fall ist. Man nimmt dann aber an, daß jeder der beiden Stoffe unter Umständen auch in der Kristallform des anderen auftreten kann (Isodimorphie). Sind zwei Kristalle in jedem Verhältnisse mischbar, so sagt man, sie bilden eine vollständige Mischungsreihe ($ZnSO_4$, $7H_2O$ und $MgSO_4$, $7H_2O$), ist ihre Löslichkeit ineinander begrenzt, so sagt man, die Mischungsreihe hat eine Lücke ($NaClO_3$ und $AgClO_3$). Besonderes Interesse bietet der Fall, daß die beiden Stoffe eine Verbindung in molekularem Verhältnis, z. B. ein Doppelsalz bilden. Ist dieses mit den beiden Komponenten unmischbar, so spricht man von einem singulären Punkt in der Mischunsgreihe. Eine feste Lösung liegt also in diesem Falle nicht vor, sondern nur dann, wenn die Zu-

sammensetzung der festen Gemische in einem wenn auch kleinen Gebiete stetig veränderlich ist. Zum Schlusse sei noch erwähnt, daß man auch bei festen Körpern oft Adsorptionserscheinungen findet, bei denen man es also ebenfalls nicht mit einer Lösung zu tun hat, sondern mit Oberflächenwirkungen. Als Beispiel sei die Adsorption von Jod durch Holzkohle erwähnt. Jedoch bildet sich in diesem Falle nebenbei noch eine feste Lösung. Man kann die beiden Vorgänge durch ihre Geschwindigkeiten unterscheiden. Während sich nämlich das Adsorptionsgleichgewicht sehr rasch einstellt, dauert die Bildung der festen Lösung, wegen der Langsamkeit der Diffusion in festen Stoffen, sehr lange.

Literatur. ***W. Nernst,*** *Theoretische Chemie Stuttgart 1909.* — ***W. Ostwald,*** *Lehrbuch der allgemeinen Chemie. Leipzig 1890 bis 1904.* — ***J. H. van't Hoff,*** *Vorlesungen über theoretische und physikalische Chemie. Braunschweig 1901 bis 1903.* — ***M. Planck,*** *Vorlesungen über Thermodynamik. Leipzig 1905.* — ***M. Planck,*** *Acht Vorlesungen über theoretische Physik. Leipzig 1910 (zweite Vorlesung).* — ***O. D. Chwolson,*** *Lehrbuch der Physik Bd. III. Braunschweig 1905.* — ***J. D. van der Waals,*** *Die Kontinuität des gasförmigen und flüssigen Zustandes. 2. Teil. Leipzig 1910.* — ***J. P. Kuenen,*** *Theorie der Verdampfung und Verflüssigung von Gemischen. Leipzig 1906.* — ***R. Abegg,*** *Die Theorie der elektrolytischen Dissoziation. Stuttgart 1903.* — ***M. Le Blanc,*** *Lehrbuch der Elektrochemie. Leipzig 1906.* — ***Fr. Förster,*** *Elektrochemie wässeriger Lösungen. Leipzig 1905.* — ***F. Kohlrausch und L. Holborn,*** *Das Leitvermögen der Elektrolyte. Leipzig 1898.*

O. Stern.

Lötrohr.

1. Historisches. 2. Reihenfolge der Operationen. 3. Tabelle zum Bestimmen der wichtigsten Mineralien mit dem Lötrohr.

1. Historisches. Das Lötrohr wird meist als eine Erfindung italienischer Glasbläser bezeichnet, doch haben es ostindische Gold- und Silberschmiede wohl schon seit Jahrtausenden in Benutzung. Für chemische Zwecke wurde es durch Kunkel (1679), für mineralogische durch v. Schwab (1738), Cronstedt (1758) und Bergmann eingeführt. Dieser lehrte die Oxydations- und Reduktionsflamme kennen, sein Schüler Gahn führte bereits Kobaltsolution als Reagens ein und machte Berzelius mit seinen Resultaten bekannt, der 1820 das Werk Die „Anwendung des Lötrohrs in der Chemie und Mineralogie" herausgab. An der Freiberger Bergakademie wurde bald darauf von Plattner auch für quantitative Mineraluntersuchungen das Lötrohr benutzt. Plattners Werk „Probierkunst mit dem Lötrohr" (die neueren Auflagen bearbeitet von Kolbeck) ist noch heute das vollständigste Handbuch.

2. Reihenfolge der Operationen. Gegenwärtig verwendet man nur für die einfachsten Fälle die ursprüngliche Form des Lötrohrs, die aus einem einzigen rechtwinklig gebogenen und in eine Spitze auslaufenden Metallrohr bestand; meist fügt man in den Winkel zwischen Spitze, die am besten zum Teil aus Platin verfertigt wird oder mindestens ein Platinblättchen enthält, und Blaserohr eine zylindrische Erweiterung ein (s. Fig. 1), deren Höhlung als Luftreservoir dient, indem es die Ungleichförmigkeiten, die infolge des Atemholens beim Blasen eintreten, ausgleicht und die Feuchtigkeit zurückhält. Zur Ver-

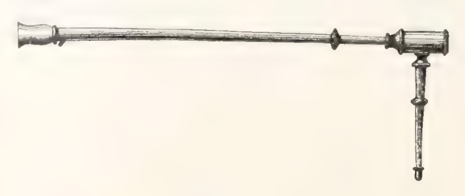


Fig. 1.

wendung des Lötrohrs ist es unerläßlich, sich an ein gleichförmiges, durch die Nase erfolgendes Atmen beim Blasen zu gewöhnen und mit den Backenmuskeln auch während des Atemholens weiterzublasen, da sonst Zuckungen der Flamme unvermeidlich wären.

Das meist aus Horn bestehende Mundstück hat entweder die abgebildete zylindrische Gestalt oder auch eine flachmuschelförmige (alsdann von außen an die Lippen anzulegende) Form.

Die Oxydationsflamme bläst man in der Weise, daß man die Spitze des Lötrohrs mitten in die Flamme hält, wie Figur 2 zeigt, und durch den Luftstrom eine kleine, nichtleuchtende „Stichflamme" aus der Hauptflamme hervorbläst. Zum Blasen

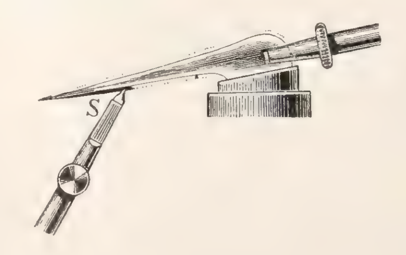


Fig. 2.

der Reduktionsflamme halte man das Lötrohr vor die Flamme (entsprechend einer Bewegung der Spitze um etwa 2 cm nach rechts in Fig. 2) und blase den Hauptteil der Flamme rechtwinklig um und zwar zu einer stark leuchtenden Flamme.

Vorbedingung hierfür ist, daß die Hauptflamme selbst schon leuchtend war, daher ist die nichtleuchtende eines Bunsenbrenners oder einer Spirituslampe zur Erzielung einer guten Reduktionsflamme nicht brauchbar, hingegen eignet sich Oel, Paraffin u. dgl. gut. Die nichtleuchtende Stichflamme enthält einen Luftüberschuß und wirkt daher oxydierend; die Reduktionsflamme aber übt durch den in ihr enthaltenen glühenden Kohlenstoff (welcher auch das Leuchten bedingt) ihre Reduktionswirkung aus. Verstärkt wird noch die Reduktionswirkung durch die als Unterlage für die Probesubstanz dienende Holzkohle, deren angeblasene Partien ebenfalls ins Glühen geraten.

Durch oxydierendes Blasen (vgl. Fig. 2) wird ein Rösten der Probesubstanz bewirkt, wobei besonders durch Geruch das Entweichen von schwefliger, antimoniger oder arseniger Säure auffällt, sowie die leichtflüchtigen Metalle (Quecksilber) oder deren Oxyde (1. Wismutoxyd, 2. Bleioxyd, 3. Cadmiumoxyd, 4. Zinkoxyd, 5. Zinnoxyd). Diese Oxyde setzen sich als Beschläge in der Nähe der Probesubstanz ab und sind auf einem Kohlestück besonders gut zu erkennen, in das man meist ein Grübchen zur Aufnahme der Probesubstanz bohrt.

Die Farbe der Beschläge ist bei gewöhnlicher Temperatur für 4 und 5 weiß, für 1 bis 3 gelb bis braun; in der Hitze ist der Beschlag oft dunkler, besonders fällt das Gelbwerden des Zinkoxydbeschlages auf.

Die reduzierende Flamme[1]) erzeugt Metallkörner aus den Erzen vieler Schwermetalle, aus Eisen-, Kobalt- und Nickelerzen aber magnetische Massen; die reduzierende Wirkung wird verstärkt, wenn die Probesubstanz mit Soda oder Cyankalium gemischt wird.

Die Flammenfärbung (besonders des Na, Li, Sr, Ba, B) wird dadurch erkannt, daß man in den heißen Flammensaum der Oxydationsflamme einen Mineralsplitter mittels einer Platinpinzette einführt (Fig. 2); in gleicher Weise prüft man auf Schmelzbarkeit; es hat v. Kobell folgende Schmelzbarkeitsskala aufgestellt:

1. Antimonglanz leicht schmelzbar in der Kerzenflamme; 2. Natrolit, nur in feinen Splittern in der Kerzenflamme schmelzbar; 3. Almandin leicht vor dem Lötrohr schmelzbar; 4. Aktinolit kleine Splitter leicht vor dem Lötrohr schmelzbar; 5. Orthoklas nur in den heißesten Teilen der durch Kohle verstärkten Lötrohrflamme in kleinsten Splittern schmelzbar; 6. Bronzit in den heißesten Teilen nur noch ein Abrunden der Kanten bemerkbar; 7. Quarz völlig unveränderbar, auch die Kanten bewahren stets ihre Schärfe.

Verschmilzt man Spuren der Probesubstanz mit sogenannten Perlen von Borax oder Phosphorsalz, so entstehen charakteristische Farben (besonders das Kobaltblau, Chromgrün, Titanviolett), die sich zum Teil ändern, je nachdem man die Oxydations- oder Reduktionsflamme des Lötrohrs zum Anblasen der Perlen benutzt, die man dabei in der Oese eines Platindrahts erzeugt.

3. Tabelle zum Bestimmen der wichtigsten Mineralien mit dem Lötrohr. Wie mittels des Lötrohrs bei Hinzunahme ganz weniger flüssiger Reagentien die Bestimmung der Mineralien erfolgt, zeigt folgende Tabelle, welche einer Einteilung von J. Moses und C. Parsons folgt.

In dieser Tabelle heißt ein Mineral weich, wenn es von Kalkspat geritzt wird; mittelhart, wenn es nicht mehr hiervon aber von einer Feilenspitze geritzt wird; hart, wenn es von beiden nicht geritzt wird. Hinter die Mineralnamen sind in der Tabelle die chemischen Formeln, vor diese Namen Abkürzungen für die zugehörigen Kristallsysteme gesetzt und zwar bedeutet C. Kubisch; T. Tetragonal; H. Hexagonal; R. Rhombisch; M. Monoklin; Tri. Triklin.

A. Erste Hauptgruppe. Mineralien mit weißem, grauem oder schwarzem, metallischem Aussehen.[1])

I. Beim Erhitzen auf Kohle entsteht:

a) Knoblauchgeruch: As- z. T. auch Sb-Mineralien.

α) Mittelhart[1]) 1. H. Arsen As: spröde, blaue Flamme, 2. H. Antimon Sb dicke Dämpfe, grüne Flamme, 3. C. Tetraedrit $Cu_2Sb_2S_7$ schwarzer Strich, 4. R. Enargit Cu_3AsS_4 schwarz, prismatisch, 5. R. Tennantit $Cu_8As_2S_7$ körnig, schwarz.

β) Hart, auch in geschlossenem Rohr auf Sublimation zu prüfen: 1. R. Leucopyrit Fe_3As_4 schwarzes Sublimat, 2. C. Gersdorfit NiAsS gelbbraunes Sublimat, 3. C. Smaltit (Co,Ni) As_2 schwarzes Sublimat, 4. C. Cobaltit CoAsS kein Sublimat, 5. C. Chloantit $(Ni,Co)As_2$ schwarzes Sublimat, 6. R. Arsenopyrit FeAsS rotes Sublimat, später schwarz.

b) Weißer Beschlag aber kein Knoblauchgeruch.

α) Weich: 1. H. Molybdänit MoS_2 grünlicher Strich, nicht schmelzbar, 2. R. Stibnit Sb_2S_3 sehr leicht schmelzbar, 3. M. Sylvanit $(Au,Ag)Te_2$ gelber Rückstand, 4. Calaverit $AuTe_2$ gelber Rückstand, 5. H. Tellur Te kein Rückstand, 6. C. Hessit Ag_2Te weißer Rückstand, 3 bis 6 liefern blaugrüne Te-Flammenfärbung, 7. R. Stephanit Ag_3SbS_4 schwarzer Strich, 8. Poly-

[1]) Sie muß leuchtend sein und wird erzeugt, indem man das Lötrohr aus der Stellung der Figur 2 um etwa 2 cm nach rechts (also aus der Flamme heraus) bewegt.

[1]) Meist Metallglanz und hohes spezifisches Gewicht, z. T. hämmerbar. Im Dünnschliff undurchsichtig.

basit $(Ag,Cu)_9SbS_6$ schwarzer Strich, 10. Pyrargyrit Ag_3SbS_3 purpurroter Strich.

β) Mittelhart: 1. H. Antimon, spröde, dicke Dämpfe, 2. C. Stannit (Cu,Sn,Fe)S Beschlag durch Kobaltlösung blau, 3. C. Tetraedrit $Cu_8Sb_2S_7$ schwarzer Strich, schwarzgraue Farbe, 4. C. Sphalerit ZnS hellbrauner Strich.

γ) Hart: C. Ullmannit NiSbS.

c) Gelber Beschlag nahe der Probe bei langem Blasen (Bi,Pb-Mineralien)

α) Weich: 1. H. Tetradymit $Bi(Te,S)_3$ blaugrüne Flamme, 2. R. Bismutinit Bi_2S_3, Dichte 6 bis 7, 3. R. Jamesonit $Pb_2Sb_2S_5$, Dichte 5,5 bis 6, 4. H. Wismut Bi, 5. C. Galenit PbS kubische Spaltbarkeit, Dichte 7,4 bis 7,6.

β) Mittelhart: 1. R. Bournonit $CuPbSbS_3$, Dichte 5,7 bis 5,9, 2. C. Clausthalit PbSe, Rettiggeruch.

γ) Hart: C. Pechblende (Uraninit) UO_2+Pb, Th usw., Phosphorsalzperle in Reduk.fl. grün.

d) Magnetischer Rückstand, aber kein Beschlag:

α) Weich: Nichts.

β) Mittelhart: 1. C. Platin Pt wenn Fe = halt. Dichte 14 bis 19, 2. C. Eisen Fe, Dichte 7,3 bis 7,8.

γ) Hart: 1. C. Linnaeit $(Co,Ni)_3S_4$, 2. Turgit $Fe_4O_7H_2$ roter Strich, dekrepiert, 3. Göthit FeO_2H gelber Strich, kristallin., 4. Limonit $2F_2O_33H_2O$ gelbbrauner Strich, 5. H. Hämatit Fe_2O_3 roter Strich, 6. M. Wolframit (Fe,Mn) WO_4, schmilzt leicht, Dichte 7,2 bis 7,5, 7. H. Ilmenit $(Fe,Mg)TiO_3$ roter Strich, violette Phosphorsalzperle i. Reduk.fl., 8. C. Magnetit Fe_3O_4 schwarzer Strich, magnetisch, 9. C. Franklinit $(Fe,Mn,Zn)_3O_4$, brauner Strich, weißer Beschlag, 10. C. Chromit $FeCr_2O_4$ brauner Strich, grüne Perle.

e) Nichtmagnetisches Metall, kein Beschlag oder Geruch:

α) Weich: 1. R. Stromeyerit $(Ag,Cu)_2S$, 2. C. Amalgam AgHg, 3. C. Argentit Ag_2S, 4. M. Tenorit CuO.

β) Mittelhart: 1. C. Silber Ag, Dichte 10 bis 11, 2. C. Platin Pt, Dichte 14 bis 19, 3. R. Chalcocit Cu_2S, spröde.

γ) Hart: H. Iridosmium.

II. Keines der Charakteristika a bis e beim Erhitzen auf Kohle:

a) Weich: 1. Quecksilber Hg, flüssig, 2. H. Graphit, C, 3. R. Pyrolusit MnO_2, strahlig oder kompakt, schwarzer Strich.

b) Mittelhart: 1. C. Alabandin MnS, grüner Strich, 2. R. Manganit MnO_2H, prismatisch, dunkelbrauner Strich.

c) Hart: 1. C. Perowskit $CaTiO_3$, violette Phosphorsalzperle in Reduk.fl., 2. R. Columbit $Fe(Nb,TaO_3)_2$, stark glänzend, Dichte 5,3 bis 7,3, 3. C. Uranpecherz (wenn Pb-frei, sonst I c γ), 4. Psilomelan H_4MnO_5, schwarzbrauner Strich, 5. T. Hausmannit Mn_3O_4, kastanienbrauner Strich, 6. T. Braunit Mn_2O_3, schwarzer Strich, 7. T. Rutil TiO_2, violette Phosphorsalzperle in Reduk.fl., 8. R. Brookit TiO_2, Perle wie Rutil, 9. Anatas TiO_2, Perle wie Rutil.

B. Zweite Hauptgruppe Mineralien mit gelbem, rotem oder bronzefarbigem Metallglanz.

Beim Erhitzen auf Kohle entsteht:

a) Knoblauchgeruch: H. Niccolit NiAs mittelhart, kupferrot, schwarzer Strich.

b) Weißer Beschlag ohne Knoblauchgeruch: R. Krennerit $(AgAu)Te_2$ messinggelb, mittelhart.

c) Nichts.

d) Magnetischer Rückstand, aber kein Beschlag.

α) Nichts.

β) Mittelhart: 1. C. Bornit Cu_3FeS_3 rotbronzener Bruch, 2. H. Millerit NiS messingfarbene Nadeln oder Haare, 3. C. Pentlandit (Fe,Ni)S hellmessinggelb, 4. Chalkopyrit $CuFeS_2$ messinggelb mit grünlichem Schiller, 5. Magnetkies (Pyrrhotit) Fe_7S_8 bronzegelb, magnetisch.

γ) Hart: 1. C. Pyrit FeS_2 2. R. Markasit FeS_2.

e) Nichtmagnetisches Metall, kein Beschlag oder Geruch: α) Nichts. β) Mittelhart: 1. C. Gold Au gelber Strich, hämmerbar, 2. C. Kupfer Cu kupferfarbener Strich, hämmerbar, 3. C. Cuprit Cu_2O. dunkelrot, braunroter Strich.

C. Dritte Hauptgruppe. In Wasser unlösliche Mineralien mit nichtmetallischem Aussehen.

I. Bei starkem Erhitzen auf Kohle mit reduzierender Flamme entsteht:

a) Knoblauchgeruch:

α) Als Pulver in kochender Salzsäure unlöslich: 1. H. Proustit Ag_3AsS_3 Farbe und Strich hochrot, 2. R. Auripigment As_2S_3 Farbe und Strich gelb, 3. M. Realgar AsS Strich orangerot, Farbe dunkler rot.

β) Als Pulver in kochender Salzsäure löslich ohne zu brausen oder zu gelatinieren:

1. R. Scorodit $FeAsO_42H_2O$, blaßgrün oder braun, 2. C. Pharmacosiderit $Fe(FeOH)_3(AsO_4)_36H_2O$ kleine Würfel, grün bis gelb, 3. M. Annabergit $Ni_3(AsO_4)_28H_2O$. apfelgrüne Kruste oder Fasern, 4. M. Erythrit $Co_3(AsO_4)_28H_2O$ karmesinrote Fasern und Prismen, 5. H. Mimetit $Pb_5Cl(AsO_4)_3$, 6. R. Olivenit $Cu_2(OH)AsO_4$ olivengrün bis braun, 7. M. Pharmacolit $HCaAsO_42H_2O$ weiße bis blaßrote Fasern und Krusten.

1 bis 4 liefern magnetischen, 5 bis 7 unmagnetischen Rückstand.

b) Weißer Beschlag ohne Knoblauchgeruch:

α) Als Pulver in kochender Salzsäure unlöslich: H. Pyragyrit Ag_3SbS_3 Farbe schwarz, Strich purpurrot.

β) Als Pulver in kochender Salzsäure löslich ohne zu brausen oder zu gelatinieren: 1. H. Zinkit ZnO dunkelrot, 2. R. Molybdit MoO_3 meist gelbes Pulver, 3. C. Senarmontit und R. Valentinit Sb_2O_3 weiß bis grau.

γ) Gelatiniert mit Salzsäure beim Kochen: 1. H. Willemit Zn_2SiO_4, 2. Calamin $(ZnOH)_2SiO_3$, Wasser im geschl. Rohr.

δ) Braust mit heißer Salzsäure: 1. C. Zinkblende (Sphalerit), entwickelt H_2S, 2. H. Smithsonit $ZnCO_3$ glasige Drusen, 3. T. Phosgenit: $(PbCl)_2CO_3$ schmilzt leicht 4. Hydrozinkit $Zn_3CO_3(OH)_4$.

c) Gelber Beschlag ohne Knoblauchgeruch:

α) Als Pulver in kochender Salzsäure unlöslich: 1. R. Anglesit $PbSO_4$ weiß, 2. Linarit $(PbCuOH)_2SO_4$ blau.

β) Als Pulver in kochender Salzsäure löslich ohne zu brausen oder zu gelatinieren: 1. T. Wulfenit $PbMoO_4$ gelbe bis braune Platten oder Pyramiden, 2. T. Stolzit $PbWO_4$, 3. H. Vanadinit $Pb_5Cl(VO_4)_3$ rote oder braune Prismen, 4. H. Pyromorphit $Pb_5Cl(PO_4)_3$ grüne bis braune Prismen, 5. M. Crocoit $PbCrO_4$ hyazintrot Strich orange.

γ) Nichts.

δ) Braust mit heißer Salzsäure: 1. R. Cerussit $PbCO_3$, 2. Bismutit $BiOBi(OH)_2CO_3$.

d) Riechendes Gas ohne Beschlag:

α) Als Pulver in kochender Salzsäure unlöslich: 1. R. Schwefel S, 2. H. Zinnober HgS, 3 Halogensilber, im Kölbchen mit $KHSO_4$ schmelzend (AgCl = C. Cerargyrit, AgClBr = C. Embolit, AgBr = C. Bromyrit, Ag J = H. Jodyrit), 4. H. Greenockit CdS irisierender Hauch auf Kohle.

e) Magnetischer Rückstand, nichts Flüchtiges:

α) In kochender Salzsäure als Pulver unlöslich: 1. M. Biotit, Mg-, Fe-haltig, 2. M. Pyroxene, reich an Fe, Prismenwinkel 87°, 3. M. Amphibole, Prismenwinkel 124°, 4. C. Granatgruppe, 5. M. Epidote, Ca-, Fe-haltig, 6. M. Acmit, Na,F-Silikat. 1 bis 5 sind Alumosilikate.

β) Als Pulver in kochender Salzsäure löslich ohne zu brausen oder zu gelatinieren: 1. M. Triplit $(Fe,Mn)_2FPO_4$ braune harzartige Massen, 2. R. Triphylin $Li(Fe,Mn)PO_4$ rote Flammenfärbung, 3. R. Hypersthen $(Mg,Fe)SiO_3$, 4. M. Vivianit $Fe_3(PO_4)_2 8H_2O$ Farbe und Strich blau, 5. Limonit $2Fe_2O_3 3H_2O$, 6. R. Goethit FeO_2H, 7. H. Hämatit Fe_2O_3. Strich für 5 bis 6 gelb oder braun, für 7 rot.

γ) Gelatiniert mit Salzsäure beim Kochen: R. Fayalit $FeSiO_4$. [1])

δ) Braust in heißer Salzsäure: 1. H. Siderit $FeCO_3$ braun, 2. H. Ankerit $(Ca,Mg,Fe)CO_3$ grau bis braun, 3. Rhodochrosit $(Mn,Fe)CO_3$ rot.

II. Auf Kohle nicht flüchtig und nicht magnetisch werdend; man prüfe die Schmelzbarkeit (vgl. die folgenden Fälle a bis e) und mache die Unterabteilungen α bis δ genau wie bei I nach der Angreifbarkeit durch HCl.

a) Leicht zu weißer Emaille schmelzend:

α) Unlöslich in HCl, 1. Tri. Albit $NaAlSi_3O_8$, 2. Tri. Oligoklas $((NaAlSi), (CaAl_2))Si_2O_8$, 3. M. Petalit $AlLi(Si_2O_5)_2$ rote Flammenf., 4. R. Cölestin $SrSO_4$ karmosin-Flammenf., 5. R. Baryt $BaSO_4$ grüne Flammenf., 6. H. Turmalin $R_{13}B_2(SiO_5)$, wo R. besonders Al, K, Mn, Fe, Mg, Li, 7. M. Pyroxene, 8. M. Amphibole (zu 7 bis 8 vgl. I e α), 9. H. Beryll $Be_3Al_2(SiO_3)_6$.

β) Nichtbrausend löslich: 1. M. Kryolit $AlNa_3F_6$, 2. T. Wernerit (Ca,Na,Al) SiO_2, 3. C. Fluorit CaF_2 rote Flammenf., 4. Gips $CaSO_4 2H_2O$, 5. Anhydrit $CaSO_4$, 6. Boracit $Mg_7Cl_2B_{16}O_{30}$ grüne Flammenf., 7. M. Stilbit, 8. M. Heulandit, 9. R. Prehnit. 7 bis 9 sind Ca-Al-Silikate, 7 bis 8 schwellen wegen ihres Wassergehalts beim Erhitzen an.

γ) Gelatinierend mit HCl: 1. M. Wollastonit $CaSiO_3$, 2. T. Apophyllit, K-Flammenf., 3. H. Chabazit, 4. C. Hauyn, 5. C. Lazurit blau gefärbt. 4 und 5 zeigen Heparreaktion, 2—5 sind Silikate des Ca + Alk., 3 bis 5 auch des Al; 2 und 3 schwellen, weil H_2O-haltig, beim Erhitzen an.

δ) Brausend in heißem HCl: 1. R. Witherit $BaCO_3$. Flammenf. gelbgrün, 2. M. Gaylussit $CaNa_2CO_3 5H_2O$.

b) Leicht zu farblosem Glas schmelzend:

α) Unlöslich in HCl: 1. Albit, 2. Oligoklas, 3. M. Pyroxene, 4. M. Amphibole (1 bis 4 auch sub a α), 5. M. Spodumen $LiAl(SiO_3)_2$ rote Flammenf., 6. M. Jadeit $NaAlSi_2O_6$, 7. M. Glaukophan $NaAl(SiO_3)_2(Fe, Mg)SiO_3$.

β) Nichtbrausend löslich: 1. Ulexit $NaCaB_5O_9 8H_2O$, 2. Tri. Labradorit $((CaAl_2), (NaAlSi))Si_2O_8$. γ) Gelatinierend mit HCl: 1. H. Nephelin $NaAlSiO_4$, 2. R. Natrolith $Na_2Al_2Si_3O_{10} 2H_2O$, 3. C. Analcim $NaAl(SiO_3)_2H_2O$, 4. M. Datolith $Ca(BOH)SiO_4$.

c) Leicht zu farbigem Glas oder Email schmelzend: α) Unlöslich in HCl: 1. M. Pyroxene, 2. M. Amphibole, 3. M. Epidote (1 bis 2 vgl. sub a α, 3 sub I e α), 4. T. Vesuvian $Ca_6Al_3OHF(SiO_4)_6$, 5. M. Titanit $CaSiTiO_5$, 6. C. Granate z. B. Spessartin $Mn_3Al_2(SiO_4)_3$ und Pyrop $Mg_3Al_2(SiO_4)_3$, 7. Tri. Axinit $H_2R_4(BO)Al_3(SiO_4)_5$, wo R. bes. Al, Ca, Mn, Fe.

β) Nichtbrausend löslich: 1. R. Atakamit grün, Flammenfärbung blau, 2. C. Cuprit Cu_2O, 3. R. Libethenit $Cu_2(OH)PO_4$ dunkelgrün, 2 bis 3 grüne Flammenf., 4. R. Autunit $Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 8H_2O$, 5. Vesuvian, 6. Prehnit (5 auch sub α, 6 sub a β, 7. Tri. Rhodonit $MnSiO_3$ rot, schmilzt schwarz.

γ) Gelatiniert mit HCl: T. Melilith Si, Al, Fe, Mg, Na, CaO-haltig, schmilzt unter Aufblähen zu gelbem oder grünem Glas.

δ) Braust mit HCl: 1. M. Azurit $Cu_3(OH)_2(CO_3)_2$ dunkelblau, 2. M. Malachit $Cu_2(OH)_2CO_3$ grün.

d) Schwer schmelzend: α) in HCl unlöslich: 1. R. Talk $H_2Mg_3(SiO_3)_4$ durch Co-Solution gerötet, 2. Glimmer und Sprödglimmer z. T., 3. Feldspate z. T. bes. Orthoklas $KAlSi_3O_8$, 4. Turmalin z. T. (vgl. zu 2 sub I e α zu 3 sub a α, b α, zu 4 sub a α), 5. H. Beryll $Be_3Al_2(SiO_3)_6$.

β) in HCl richtbrausend löslich: 1. H. Apatit $Ca_5(F,Cl)(PO_4)_3$ rote Flammenf. mit H_2SO_4 grün werdend, 2. T. Scheelit $CaWO_4$ Phosphorsalzperle, reduz. gebl., beim Erkalten blau, 3. M. Colemanit $Ca_2B_4O_{11}5H_2O$ grüne Flammenf., 4. Serpentin $H_4Mg_3Si_2O_9$.

γ) Gelatiniert mit HCl: 1. M. Wollastonit $CaSiO_3$ gelbrote Flammenf., 2. Feldspate z. T. bes. Tri. Anortit $CaAl_2Si_2O_8$, 3. Meerschaum (= Sepiolith) $H_4Mg_2Si_3O_{10}$ durch Co-Solution gerötet, 4. R. Calamin $(ZnOH)_2SiO_3$, 5. N. Willemit Zn_2SiO_4. 4 bis 5 geben mit Soda weißen Zn-Beschlag.

δ) Braust mit HCl: 1. R. Strontianit $SrCO_3$ Flammenf. karmesin, 2. M. Barytocalcit (Ba,Ca) CO_3 Flammenf. gelbgrün.

e) Unschmelzbar: α) in HCl unlöslich: 1. M. Kaolinit $H_4Al_2Si_2O_9$, 2. M. Gibbsit $Al(OH)_3$, 3. H. Alunit $KAlCO_3(SO_4)_2 3H_2O$, 4. M. Lazulit R. $Al_2(OH)_2(PO_4)_2$ blau, 5. Tri. Cyanit Al_2SiO_5 blaßblau, 6. R. Sillimanit Al_2SiO_5, 7. R. Anda-

[1]) Das zur Epidotgruppe gehörige Ce- u. Y-haltige seltene Mineral Allanit gehört meist zur Rubrik α, nach dem Glühen aber zu γ.

lusit Al_2SiO_5, 8. R. Diaspor AlO_2H, 9. H. Phenakit Be_2SiO_4, 10. C. Spinell $MgAl_2O_4$, 11. R. Topas $Al_2F_2SiO_5$, 12. R. Chrysoberyll $BeAl_2O_4$ gelb bis grün, 13. H. Korund Al_2O_3, Nr. 1 bis 13 werden durch Co-Solut. stark blau gefärbt, 14. T. Rutil TiO_2, 15. T. Cassiterit SnO_2, 16. H. Quarz SiO_2, 17. Opal SiO_2H_2O, 18. T. Zirkon $ZrSiO_4$. 19. R. Staurolith $FeAl_5O_5HSiO_4$, 20. H. Turmalin $R_{18}B_2(SiO_5)_4$, 21. C. Granate z. T., bes. Uvarovit $Ca_2Cr_3(SiO_4)_3$, 22. C. Diamant C.

β) Nichtbrausend löslich: 1. Bauxit $Al_2O_5H_4$, 2. R. Wavellit $Al_6(OH)_6(PO_4)_49H_2O$, 3. Türkis $Al_2(OH)_3PO_4H_2O$ blaugrün (Kallait, 4. C. Leucit $KAl(SiO_3)_2$, 1 bis 4 durch Kobaltsolut. gebläut, 5. M. Monazit $(Ce,La,Di)PO_4$, 6. H. Brucit $Mg(OH)_2$, durch Co-Sol. gerötet, 7. Wad, unrein. Mn-Oxyd, 8. Garnierit $H_2(Ni,Mg)SiO_4H_2O$ grün, 9. Chrysocoll $CuSiO_32H_2O$ grün bis himmelblau.

γ) Gelatiniert mit HCl; 1. T. Thorit $ThSiO_4$ orange bis braun, 2. H. Dioptas H_2CuSiO_4 grün, 3. Olivin $(Mg,Fe)_2SiO_4$, 4. Chondrodit $H_2Mg_{19}Si_8O_{34}F_4$.

δ) Braust mit HCl: 1. Magnesit $MgCO_3$, 2. H. Rhodochrosit $MnCO_3$ rötlich bis rot, 3. H. Calcit $CaCO_3$, 4. Aragonit $CaCO_3$, 5. H. Dolomit $(CaMg)CO_3$.

D. Vierte Hauptgruppe. In Wasser lösliche Mineralien (stets nichtmetallisch aussehend).

Die Flammenfärbung ist a) grün: 1. Tri. Sassolin H_3BO_3, 2. M. Borax[1]) $Na_2B_4O_710H_2O$, 3. Chalcanthit $CuSO_45H_2O$; b) violett: 1. R. Salpeter KNO_3, 2. C. Sylvin KCl, 3. M. Kainit $MgSO_4KCl3H_2O$, 4. C. Alaun $KAl(SO_4)_212H_2O$; c) gelb: 1 M. Mirabilit $Na_2SO_410H_2O$, 2. M. Trona $Na_2CO_3NaHCO_32H_2O$, 3. M. Glauberit $Na_2SO_4CaSO_4$, 4. C. Halit (Steinsalz) NaCl, 5. R. Thenardit Na_2SO_4; d) nichtcharakteristisch: 1. C. Salmiak NH_4Cl mit H_2SO_4 Salzsäuredämpfe, 2. R. Mascagnin $(NH_4)_2SO_4$ Heparreaktion mit Soda, Geruch v. NH_3, 3. R. Epsomit $MgSO_47H_2O$ schmilzt im Kristallwasser, dann unschmelzbar, während 1 und 2 sublimieren. 4. Copiapit $Fe_3(OH)_2(SO_4)_518H_2O$.

[1]) Hier besonders ist das meist empfehlenswerte Befeuchten mit H_2SO_4 nötig; Borax allein färbt die Flamme gelb.

Literatur. ***Plattner***, *Probierkunst mit dem Lötrohr. Bearbeitet von* *K o l b e c k.*

E. Sommerfeldt.

Lovén
Sven Ludwig.

Geboren am 9. Januar 1809 in Stockholm; gestorben am 4. September 1895 daselbst. Er studierte in Lund, wo er auch 1829 promovierte. Er wurde Dozent für Zoologie in Stockholm, hielt sich studienhalber eine Zeitlang in Berlin auf und machte dann ausgedehnte wissenschaftliche Reisen, in Norwegen, nach der schwedischen Westküste und Finnmarken. Im Jahre 1837 leitete er die erste wissenschaftliche Expedition nach Spitzbergen. Bald darauf, 1840, wurde L o v é n Professor und Intendant am naturgeschichtlichen Reichsmuseum in Stockholm. Seine ausgedehnten Arbeiten haben in der Hauptsache die Anatomie und Physiologie der Meeresfauna zum Gegenstand. Besonders hervorzuheben sind seine Arbeiten über die Bildungsgesetze der Mollusken, wovon er eine besonders auf die Entwickelungsgeschichte begründete zusammenfassende Darstellung gab (1848). Außerdem berührte er in seinen zahlreichen Arbeiten die Entwickelung der Polypen, Würmer und Crustaceen. Erwähnt seien ferner seine Verdienste um die Erforschung der geographischen Verbreitung der Tiere, namentlich die der Vögel, in den nördlichen Breiten. Ein ausführliches Verzeichnis seiner Schriften und Nekrolog findet sich in S v e n L o v é n Lefnadsteckning föredragen på Kungl. Vetenskaps-Akademiens högtidsdag 1903.

W. Harms.

Ludwig
Karl.

1816 bis 1895. Er wurde geboren in Witzenhausen, studierte in Marburg und Erlangen, promovierte 1839 in Marburg, war hier seit 1841 zweiter anatomischer Prosektor, habilitierte sich 1842 für Physiologie, wurde 1846 Professor extraordinarius für vergleichende Anatomie, 1849 ordentlicher Professor der Anatomie und Physiologie in Zürich, 1855 Professor der Physiologie und Zoologie am Josephinum in Wien und war schließlich seit 1865 Ordinarius der Physiologie und Direktor des Physiologischen Instituts in Leipzig. L u d w i g steht unter den Physiologen der Neuzeit in vorderster Reihe, Mit zahlreichen Genossen hat er dazu beigetragen, daß endgültig auch in der Physiologie die spekulativen Richtungen beseitigt und dafür ausschließlich die exakten Untersuchungsmethoden maßgebend wurden. Unter seinen großen Arbeiten sind zu nennen die Habilitationsschrift über den Mechanismus der Harnabsonderung, über Endosmose, über Blutbewegung, für die er speziell die graphische Methode (mit dem Kymographen) ersann, über den Einfluß von Atmung und Nervensystem auf die Blutbewegung, über die Methode zur Untersuchung „überlebender Organe“, über Speichelabsonderung, allgemeine Muskel- und Nervenphysiologie, zahlreiche Entdeckungen in der physiologischen Chemie u. v. a. L u d w i g , der auch ein Lehrbuch der Physiologie des Menschen (Leipzig 1852/56 in 2 Bänden 2. Aufl. 1858/61) veröffentlichte, ist das Haupt einer großen Physiologenschule geworden, zu der u. a., um nur die bekanntesten zu nennen, M o s s o , v. C y o n , T h i r y , C l o e t t a , K r o n e c k e r , V e r w o r n gehören.

Literatur. *Biogr. Lex. Ed.* ***Pagel*** *p. 1055.*

J. Pagel.

Luftdruck.

1. Die Luft ein schwerer Körper. 2. Der Luftdruck ist gleich dem Gewicht der vertikalen Luftsäule. 3. Messung des Luftdruckes. 4. Normalluftdruck. 5. Mittlerer Luftdruck. 6. Die tägliche Luftdruckschwankung. 7. Abnahme des Luftdruckes mit der Höhe. 8. Höhe der homogenen Atmosphäre. 9. Luftdruckabnahme in großen Höhen. 10. Spezifisches Gewicht der Luft. 11. Auftrieb. 12. Reduktion von Wägungen auf den leeren Raum. 13. Apparate, bei denen der Luftdruck Verwendung findet: a) Variometer. b) Heber. c) Stechheber. d) Pumpen. 14. Mensch und Luftdruck.

1. Die Luft ein schwerer Körper. Schon vor Aristoteles hat man vermutet, daß die Luft schwer sei; doch ergab der Versuch, ihr Gewicht zu messen, anscheinend das Gegenteil. Wenn man z. B. eine zusammengedrückte, also keine Luft enthaltende Schweinsblase auf eine Wage legt, so wiegt sie ebensoviel wie eine mit Luft aufgeblasene. Füllt man sie aber mit Kohlensäure, so erscheint sie schwerer, füllt man sie mit Leuchtgas, so wird das Gewicht verringert. Die aus derartigen Erfahrungen geschöpfte Ansicht, daß die Luft gar kein Gewicht habe, andere Gase aber, wie die Kohlensäure, schwer, und noch andere, wie das Leuchtgas, „leicht" seien, d. h. sich von der Erde zu entfernen streben, wurde erst 1640 von Galilei als irrig erkannt und namentlich durch seinen Schüler Torricelli (1608 bis 1647) widerlegt. Der Fehler in dem angeführten Gedankengange beruht darauf, daß beim Herausdrücken der Luft aus der Blase deren Volumen nicht unverändert bleibt; macht man den Versuch mit einem starren Behälter (Glaskolben), so tritt in der Tat der erwartete Ausschlag ein.

2. Der Luftdruck ist gleich dem Gewicht der vertikalen Luftsäule. Jedes Gas, das in einem festen Behälter eingeschlossen ist, befindet sich in einem bestimmten Spannungszustand, der sich als Druck auf die Wände des Gefäßes äußert. Auch die Luft am Erdboden zeigt einen solchen inneren Druck. Da der Atmosphäre nach dem Weltraume zu keine Grenzen gesetzt sind, so muß dieser Luftdruck durch das Gewicht der vertikalen Luftsäule bis zur Grenze der Atmosphäre hervorgerufen sein, ebenso wie der Druck am Grunde des Ozeans durch das Gewicht der Wassersäule bis zur Oberfläche erzeugt wird. Strenggenommen gilt dies allerdings nur, wenn statisches Gleichgewicht in der Atmosphäre herrscht, wenn also kein vertikaler „Gradient" vorhanden ist. In der Tat ist dieser fast immer so klein, daß er vernachlässigt werden kann: nur bei den heftigen Wirbelbewegungen der Gewitterböe (um eine horizontale Achse) und der Tromben (um eine vertikale Achse) ist ein stärkerer vertikaler Gradient vorhanden, so daß die hier erhaltenen Luftdruckwerte nicht mehr das Gewicht der vertikalen Luftsäule darstellen.

3. Messung des Luftdruckes. Nach Pascal soll ein Gärtner in Florenz bei der Anlage einer Saugpumpe zum ersten Male die Beobachtung gemacht haben, daß das Wasser in dem Saugrohre nicht höher als etwa 10 m hinaufsteigt. Man kann dies als die erste primitive Messung des Luftdruckes betrachten. Torricelli fand 1643 die Erklärung dafür und gab zugleich einen einfachen Demonstrationsversuch an: Eine an einem Ende geschlossene Glasröhre wird mit Quecksilber gefüllt und dann in umgekehrter Stellung in ein gleichfalls mit Quecksilber gefülltes Gefäß gesetzt (Fig. 1). Dann sinkt das Quecksilber in der Röhre so weit zurück, daß seine Kuppe sich in einer Höhe von etwa 76 cm über der Oberfläche des Quecksilbers befindet. Auf dem Prinzip dieses einfachen Versuches beruhen unsere Quecksilberbarometer (vgl. den Artikel „Barometer"). Der Versuch lehrt, daß das Gewicht der gesamten Luftsäule bis zur Grenze der Atmosphäre ebensogroß ist wie das Gewicht einer 76 cm hohen Quecksilbersäule. Gewöhnlich gibt man den Luftdruck in Millimetern Quecksilber an, in den Ländern englischer Zunge jedoch in englischen Zoll; um diese in Millimeter umzurechnen, hat man sie mit 25,4 zu multiplizieren (30 englische Zoll sind 762,0 mm).



Fig. 1. Torricellis Versuch.

Um ein einheitliches Maßsystem herbeizuführen, ist mehrfach vorgeschlagen worden, den Luftdruck in absolutem Maß anzugeben. Eine Quecksilbersäule von 760 mm Höhe und 1 qcm Querschnitt hat ein Volumen von 76 ccm. Da 1 ccm Quecksilber 13,596 g wiegt, so ist das Gewicht dieser Säule $76 \times 13{,}596$ g oder 1,0333 kg. Da dies gleich dem Gewicht der Luftsäule ist, beträgt also der normale Luftdruck 1,0333 kg pro Quadratzentimeter oder 10 333 kg pro Quadratmeter. Um auf das CGS-Maßsystem überzugehen, haben wir diese Zahl noch mit der Schwerebeschleunigung für 45° Breite (981) zu multiplizieren und erhalten so den Wert von 1 013 200 Dynen pro Quadratzentimeter (Dimension $cm^{-1}\ g\ sec^{-2}$) oder 1,0132 Megadyne pro Quadratzentimeter.

Für die Megadyne pro Quadratzentimeter haben Bjerknes und Sandström die Bezeichnung „Bar" (b), und hiervon abgeleitet „Dezibar" (db), „Centibar" (cb) und „Millibar" (mb) vorgeschlagen; das

Millibar spielt etwa dieselbe Rolle wie das Millimeter Quecksilber (1 mb = $^3/_4$ mm Quecksilber).

Zu meteorologischen Zwecken, wo die Luftdrucke an einer großen Zahl von Orten verschiedener Seehöhe verglichen werden müssen, ist es üblich, dieselben auf das Meeresniveau zu reduzieren. Köppen hat jedoch mit Rücksicht auf die zu hoffende allgemeine Einführung des absoluten Maßsystems vorgeschlagen, in Zukunft die Luftdrucke statt auf das Meeresniveau stets auf eine Seehöhe von 106 oder 100 m zu reduzieren, wo der mittlere Luftdruck gerade 1 Bar beträgt.

Endlich werden seit dem 1. Januar 1901 allgemein die mit Quecksilberbarometer gemessenen Luftdrucke (nicht die mit Aneroiden gemessenen) wegen der Veränderlichkeit der Schwere mit der geographischen Breite auf Normalschwere (gültig für 45° Breite) reduziert. Die Reduktion geschieht nach der Formel

$$b=b'\,(1-0{,}0026 \cos 2\varphi),$$

wo b' der unkorrigierte, b der korrigierte Barometerstand und φ die geographische Breite ist. Die dem Stande b' hinzuzufügende Korrektion $b-b'$ ist also $= -b'.0{,}0026 \cos 2\varphi$. Hiernach ist beispielsweise ein Barometerstand von 760 mm um den folgenden Betrag zu korrigieren:

$\varphi =$	0°	12°	22°	30°	36°	24°
	∓1,97	∓1,80	∓1,42	∓0,98	∓0,61	∓0,21
$\varphi =$	90°	78°	68°	60°	54°	48°

4. Normalluftdruck. Gewöhnlich betrachtet man die Quecksilberhöhe von 760 mm, die ungefähr für das Meeresniveau gilt, als Normalwert. Dieser Druck wird auch kurz als 1 Atmosphäre bezeichnet und häufig, namentlich in der Technik, als Einheit zur Messung höherer Drucke verwendet.

Statt 760 mm Quecksilber oder 1,0333 kg pro Quadratzentimeter benutzt man jedoch häufig auch genau 1 kg pro Quadratzentimeter als Einheit (sogenannte Preußische oder „kleine" Atmosphäre).

Bei Einführung des absoluten Maßsystems (s. oben) würde es sich empfehlen, da sich der 760 mm Quecksilber entsprechende Druck von 1,0132 Megadynen pro Quadratzentimeter nur wenig von der Einheit unterscheidet, als Normalluftdruck genau 1 Megadyne oder 1 Bar zu wählen. Dieser neue Normaldruck von 1 b entspricht nach der alten Bezeichnungsweise 750,1 mm Quecksilber und stimmt überein mit dem mittleren Luftdruck in 106 m über dem Meere.

5. Mittlerer Luftdruck. Der Luftdruck von 760 mm bezieht sich auf die Meeresoberfläche; auf dem Lande ist er je nach der Seehöhe geringer, z. B. auf dem Montblanc durchschnittlich nur gleich 420 mm. Der wirkliche Mittelwert für die nördliche Halbkugel der Erde, für die eine mittlere Seehöhe von 730 m anzunehmen ist, beträgt nach Hann 734,2 mm, der für die südliche Halbkugel bei 100 m mittlerer Seehöhe 747,7 mm. Für die ganze Erdoberfläche und die ihr entsprechende mittlere Seehöhe von 415 m ergibt sich 741 mm.

Auch an der Meeresoberfläche ist der mittlere Luftdruck nicht überall derselbe. Erstens besteht eine gesetzmäßige Verteilung nach der geographischen Breite, wie die folgende Tabelle von Ferrel zeigt:

Mittlerer Luftdruck im Meeresniveau (700 +).

Breite	0	5	10	15	20	25	30	35	40
Nordhalbkugel	58,0	58,0	57,9*	58,3	59,2	60,4	61,7	62,4	62,0
Südhalbkugel	58,0	58,3	59,1	60,2	61,7	63,2	63,5	62,4	60,5
Breite	45	50	55	60	65	70	75	80	
Nordhalbkugel	61,5	60,7	59,7	58,7	58,2*	58,6	60,0	60,5	
Südhalbkugel	57,3	53,2							

Am Aequator liegt also ein Minimum, in den sogenannten „Roßbreiten" (30 bis 35°) ein Maximum, und bei 60 bis 70° wieder ein Minimum. Diese Druckverteilung steht in enger Beziehung zu der Gesamtzirkulation der Atmosphäre zwischen Pol und Aequator.

Zweitens ist der Luftdruck unter sonst gleichen Umständen über den kälteren Räumen größer als über den wärmeren, also a) im Winter über den Festländern, im Sommer über den Meeren und b) im Januar über der nördlichen, im Juli über der südlichen Halbkugel.

Drittens kommt noch in Betracht, daß über hohen Kontinenten bei zunehmender Luftdichte Luft abfließen, bei abnehmender aber zuströmen muß; durch diese Verschiebung muß der Bodendruck bei Erwärmung auf den tieferen Stufen abnehmen, auf den höheren zunehmen; bei Abkühlung umgekehrt.

Der niedrigste Luftdruck, der bisher innerhalb der Erdatmosphäre beobachtet worden ist, wurde am 5./XI. 1908 von einem Gummiballon (Brüssel) in 29 000 m Höhe registriert und beträgt 10 mm Quecksilber. Am Meeresniveau wurde 686,3 mm am 2./VIII. 1891 bei einem Taifun in der China-See beobachtet. Der größte beobachtete Luftdruck ist 793,6 mm auf Franz Joseph-

Land und 793,0 in Tomsk, Sibirien (Seehöhe 73 m).

6. Tägliche Luftdruckschwankung. Der Luftdruck zeigt einen außerordentlich regelmäßigen täglichen Gang (Fig. 2), der am stärksten in den Tropen ausgeprägt ist und nach den Polen zu Null wird. Merkwürdigerweise besitzt er aber nicht wie alle anderen, mit der Erdrotation zusammenhängenden Schwankungen e i n Maximum und e i n Minimum täglich, sondern z w e i. In der unten folgenden Tabelle sind die Zahlenwerte für 4 Stationen nach H a n n gegeben.

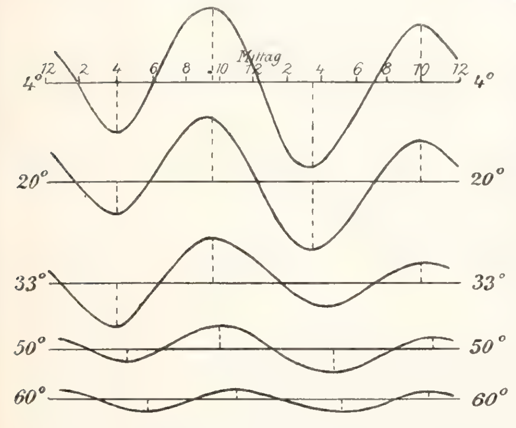


Fig. 2. Tägliche Schwankung des Luftdruckes in verschiedenen geographischen Breiten.

Die genauere Untersuchung zeigt, daß die tägliche Luftdruckschwankung sich in eine ganztägige und in eine halbtägige zerlegen läßt. Die erstere ist lediglich ein Temperatureffekt und fällt daher auf dem Lande stärker aus als auf den Ozeanen, in Tälern stärker als in der Ebene usw. Die halbtägige Schwankung ist dagegen unabhängig von der Temperatur; ihre Amplitude nimmt nahezu mit dem Quadrat des Cosinus der geographischen Breite ab. Nach A. S c h m i d t ist die Amplitude $(0{,}988 - 0{,}573 \sin^2 \varphi) \cos^2 \varphi$. Die Eintrittszeiten der Extreme sind auf der ganzen Erde dieselben (Maxima 9 bis 10 a. m. und 9 bis 10 p. m.; Minima 3 bis 4 a. m. und 3 bis 4 p. m.). Im Laufe des Jahres zeigt diese halbtägige Welle eine bemerkenswerte Aenderung; die Amplituden sind am größten zur Zeit der Aequinoktien, am kleinsten zur Zeit der

Mittlere Abweichung des Luftdruckes vom Tagesmittel.

Zeit	4½° Br. Stiller Ozean	33½° Br. über dem Ozean	43½° Br. St. Martin de Hint	59°52′ Br. Upsala
nachts 12	0,42	0,07	0,27	0,11
2	—0,27	—0,48	—0,02	0,03
4	—0,74*	—0,64*	—0,27*	—0,06*
6	—0,05	—0,05	—0,11	—0,07
8	0,94	0,49	0,20	0,04
10	**1,07**	**0,69**	**0,35**	**0,16**
mittags 12	0,23	0,39	0,04	0,07
2	—1,00	—0,13	—0,34	—0,09
4	—1,30*	—0,40*	—0,47*	—0,17*
6	—0,55	—0,27	—0,21	—0,13
8	0,27	0,10	0,15	0,01
10	**0,89**	**0,28**	**0,41**	**0,10**

Solstitien, und zwar im Juni noch kleiner als im Januar.

Da es kein anderes meteorologisches Element gibt, das eine so ausgesprochene halbtägige Periode mit erheblichen Amplituden besäße, hat man vielfach versucht, kosmische Ursachen zur Erklärung der Doppelschwingung heranzuziehen, z. B. A r r h e n i u s den Strahlungsdruck. W. T h o m s o n hat vermutet, daß man es mit einer freien Schwingung der Atmosphäre zu tun hat, und M a r g u l e s hat diese Frage rechnerisch geprüft. Er berechnete, daß e i n f a c h e Schwingungen nur von den Perioden 13,87, 9,22, 6,63 ... Stunden möglich sind, die also mit der Periode der Erdrotation nicht in Uebereinstimmung gebracht werden können; dagegen erhielt er für (freie) D o p p e l wellen die Periode von 11,94 Stunden usw. (alle folgenden kleiner). Da nun auch die tägliche Temperaturschwankung eine wenn auch sehr schwache Doppelwelle enthält, so schließt M a r g u l e s, daß diese geringe Anregung genügt, um die freie Schwingung der doppelten Luftdruckwelle auszulösen.

7. Abnahme des Luftdruckes mit der Höhe. Nachdem T o r r i c e l l i durch Konstruktion des ersten Quecksilberbarometers nachgewiesen hatte, daß die Luft überhaupt einen Druck ausübte, erkannte man bald, daß dieser Druck mit der Höhe abnehmen muß. P a s c a l ließ im Jahre 1648, wohl auf Anregung von D e s c a r t e s,

den Druckunterschied zwischen Gipfel und Fuß des Puy de Dome in der Auvergne messen. Seine noch für den heutigen Leser sehr interessante Schrift: Récit de la grande Expérience de l'Equilibre des Liqueurs, Paris 1648, ist 1893 von Hellmann in Faksimiledruck neu herausgegeben worden (Nr. 2 der „Neudrucke von Schriften und Karten über Meteorologie und Erdmagnetismus", Berlin).

Die Theorie dieser Luftdruckabnahme mit der Höhe stellt die wichtigste Anwendung der Gasgesetze auf die Atmosphäre dar.

Erhebt man sich in der Atmosphäre um das Höhenintervall dh, so nimmt der Druck p um das Gewicht der Luftsäule von der Höhe dh ab:

$$-dp = \varrho \, dh,$$

wo ϱ das Gewicht der Luftsäule (vom Querschnitt = Einheit) von der Höhe 1 an der betreffenden Stelle ist. Dies ϱ vergleicht man mit dem Gewicht (ϱ) einer zweiten, sonst gleichen Luftsäule, die jedoch die Temperatur 0^0 hat, und erhält:

$$\frac{\varrho}{(\varrho)} = \frac{273}{T} = \frac{1}{1+\alpha t}$$

(T = absolute Temperatur; t = Temperatur in Celsiusgraden; α = Ausdehnungskoeffizient der Gase = $\frac{1}{273}$); dieses (ϱ) vergleicht man mit dem Gewicht ϱ_0 einer dritten Luftsäule von derselben Höhe 1 und derselben Temperatur 0^0, aber dem Druck p_0, und erhält:

$$(\varrho) = \frac{p}{p_0} \varrho_0$$

Die beiden letzten Gleichungen geben zusammen:

$$\varrho = \frac{p}{p_0} \frac{\varrho_0}{(1+\alpha t)}.$$

Damit schreibt sich die Ausgangsformel:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{\varrho_0}{p_0} \frac{dh}{(1+\alpha t)}.$$

Integriert man diese Gleichung, so wird

$$\int \frac{dp}{p} = \log nat \, p = konst - \frac{\varrho_0 h}{p_0 (1+\alpha t)}$$

Setzt man h = 0 und $p = p_0$, so zeigt sich, daß die Integrationskonstante gleich $\log nat \, p_0$ ist. Führt man noch die Hilfsgröße $H = \frac{p_0}{\varrho_0}$ ein, so erhält man die barometrische Höhenformel:

$$\log nat \left(\frac{p_0}{p}\right) = \frac{h}{H(1+\alpha t)}.$$

8. Höhe der homogenen Atmosphäre (virtuelle Druckhöhe). Der Hilfsgröße

$$H = \frac{p_0}{\varrho_0}$$

des vorigen Abschnittes läßt sich eine physikalische Bedeutung beilegen. $H \varrho_0$ ist ($= p_0$) das Gewicht der ganzen über dem Beobachter befindlichen Luftsäule. Da ϱ_0 das der untersten Höheneinheit eben dieser Luftsäule ist, so müßte H die Höhe der ganzen Säule angeben unter der Voraussetzung, daß die Luftdichte überall konstant wäre, was freilich nicht der Fall ist. Man bezeichnet deshalb H als Höhe der homogenen Atmosphäre oder virtuelle Druckhöhe. Sie ist durch das Molekulargewicht des Gases bestimmt und beträgt für gewöhnliche Luft 7991 m; zieht man für genauere Rechnungen die Abnahme der Schwere mit der Höhe in Betracht, so ergibt sich 8001 m, berücksichtigt man außerdem noch die innere Gravitation der Atmosphäre, so findet man nach Emden 8000 m. Für die wichtigsten atmosphärischen Gase hat H folgende Werte:

(Geocoronium etwa	584 000)	Stickstoff . .	8261
Wasserstoff . . .	114 980	Luft . . .	**7991**
Helium	58 420	Sauerstoff .	7229
Wasserdampf . .	12 830	Argon . . .	5801
Neon	11 600	Kohlensäure	5226

Für die Zwecke der barometrischen Höhenmessung (vgl. den Artikel „Barometer"), d. h. für alle Höhen, innerhalb deren man den Luftdruck zur Höhenbestimmung verwendet (Maximum bisher 29 km), genügt es, die Luft als ein einheitliches Gas zu betrachten und die summarische Konstante 8000 zu benutzen.

9. Luftdruckabnahme in großen Höhen. Um den Luftdruck in größeren Höhen zu berechnen, muß man die Aenderung in der Zusammensetzung des atmosphärischen Gasgemisches berücksichtigen. Oberhalb 70 km Höhe wird nach Hann der Wasserstoff der vorherrschende Bestandteil, oberhalb etwa 200 km nach A. Wegener das hypothetische Gas Geocoronium, das noch leichter als Wasserstoff sein und die grüne Spektrallinie des Polarlichts erzeugen soll. Um den Luftdruck in diesen Höhen zu bestimmen, muß man die Abnahme der Partialdrucke der einzelnen Bestandteile mit der Höhe berechnen; die Summe aller Partialdrucke gibt dann überall den Gesamtluftdruck, das Verhältnis der einzelnen Partialdrucke zum Gesamtluftdruck aber den Anteil der betreffenden Gase an der Zusammensetzung in Volumenprozenten. Der letztgenannte Autor hat auf diese Weise die folgenden wahrscheinlichen Werte für Luftdruck und Zusammensetzung in großen Höhen berechnet (Tabelle siehe nächste Seite).

Das Vorhandensein dieser leichten Gase in den höchsten, der aerologischen Forschung nicht mehr zugänglichen Schichten der Atmosphäre wird durch eine Reihe indirekter Beobachtungen bestätigt. Das Spektrum der Sternschnuppen (150—80 km) zeigt nach Pickering im wesentlichen die Wasserstofflinien, die nach Carlheim-Gyllenskjöld auch im Spektrum des Polarlichts, und zwar deutlicher am oberen Ende der Strahlen als am unteren, zu erkennen

Luftdruck und Zusammensetzung in großen Höhen der Atmosphäre.

Höhe km	Luftdruck mm	(Geocoronium) Vol. %	Wasserstoff Vol. %	Helium Vol. %	Stickstoff Vol. %	Sauerstoff Vol. %	Argon
0	760	0,00058	0,0033	0,0005	78,1	20,9	0,937
20	41,7	0	0	0	85	15	.
40	1,92	0	1	0	88	10	.
60	0,106	4	12	1	77	6	.
80	0,0192	19	55	4	21	1	.
100	0,0128	29	67	4	1	.	.
120	0,0106	32	65	3	.	.	.
140	0,00900	36	62	2	.	.	.
200	0,00581	50	50	1	.	.	.
300	0,00329	71	29	.	.	.	.
400	0,00220	85	15	.	.	.	.
500	0,00162	93	7	.	.	.	.

sind; die höchsten Polarlichter („homogene Bögen") geben indessen nur eine einzige, noch unbekannte Spektrallinie („Polarlichtlinie", Wellenlänge 557 $\mu\mu$), die dem hypothetischen Gas Geocoronium zuzuschreiben sein dürfte. Einen weiteren Beweis für das Vorhandensein leichter Gase oberhalb 70 km Höhe bilden nach v. d e m B o r n e die Schallreflexionen, wie sie namentlich bei der von d e Q u e r v a i n beschriebenen Dynamitexplosion an der Jungfraubahn am 15./XI. 1908 beobachtet wurden. Endlich hat L e n a r d gezeigt, daß das Auftreten von Polarlichtern oberhalb 300 km Höhe, wie es von S t ö r m e r durch photogrammetrische Höhenmessung nachgewiesen wurde, an sich schon ein Beweis dafür ist, daß die obersten Atmospärenschichten aus leichten Gasen bestehen müssen, da bei ungeänderter Zusammensetzung der Luftdruck in diesen Höhen bereits auf so kleine Beträge gesunken sein müßte, daß eine merkliche, mit Leuchterscheinung verbundene Absorption der von der Sonne kommenden Kathodenstrahlen nicht mehr eintreten könnte.

10. Spezifisches Gewicht der Luft. Ebenso wie bei festen und flüssigen Körpern wird auch bei der Luft das Gewicht eines Kubikzentimeters derselben als ihr spezifisches Gewicht bezeichnet. Es ist dem Druck proportional. Geht man vom Meeresspiegel, wo der Barometerstand 76 cm beträgt, um 1050 cm in die Höhe, so sinkt der Barometerstand um 0,1 cm. Das spezifische Gewicht der Luft bei einem Barometerstande von 76 cm ist somit, wenn wir dasjenige von Quecksilber gleich 13,6 nehmen:

$$\lambda_0 = 13.6 \times \frac{0.1}{1050} = 0.00129$$

Haben wir einen Barometerstand von b cm Quecksilber, so ist nach dem B o y l e - M a r i o t t e schen Gesetz das spezifische Gewicht

$$\lambda = 0.00129 \times \frac{b}{76}$$

Diese Zahl gilt streng nur für die Temperatur 0° C.

11. Auftrieb. Ebenso wie ein in Wasser getauchter Körper einen Auftrieb erfährt, der gleich dem Gewicht des verdrängten Wassers ist, so erfährt auch jeder in der Luft befindliche Körper einen solchen Auftrieb, der gleich dem Gewicht des verdrängten Luftquantums ist. Wenn dieses größer ist als das eigene Gewicht des Körpers, so besitzt dieser eine Tendenz aufzusteigen, die als Steigkraft bezeichnet wird. Man hat also die für Luftballone wichtige Beziehung:

Steigkraft = Auftrieb — Gewicht.

Das „Abwiegen" eines Ballons vor der Abfahrt besteht darin, daß man durch Mitgeben von Ballast das Gewicht beinahe gleich dem Auftrieb macht, so daß die Steigkraft fast Null wird. Die unvermeidlichen Gasverluste während der Fahrt bewirken, daß das Gewicht des Ballons größer wird, indem ein Teil des spezifisch leichteren Leuchtgases oder Wasserstoffs durch die schwerere Luft ersetzt wird. Diese Gewichtsvermehrung muß durch dauernde Ausgabe von Sandballast kompensiert werden, um die Steigkraft nicht negativ werden zu lassen; tritt dies ein, wenn der Ballast verbraucht ist, oder Ventil gezogen wird, so sinkt der Ballon zur Erde herab (vgl. den Artikel „L u f t f a h r t").

12. Reduktion von Wägungen auf den leeren Raum. Wegen des Auftriebs, den sowohl die Gewichtsstücke als auch der zu wiegende Körper in der Luft erfahren, müssen genaue Wägungen stets mit einer „Reduktion auf den leeren Raum" versehen sein. Diese ist Null, wenn der zu wiegende Körper genau dasselbe spezifische Gewicht besitzt wie die Gewichtstücke, und wird um so größer, je größer der Unterschied der spezifischen Gewichte ist.

Nennt man: m das scheinbare Gewicht des Körpers in der Luft, d. h. die Gewichtstücke, die ihm in der Luft das Gleichgewicht halten; M das Gewicht im leeren Raume; λ das spezifische Gewicht der Luft (s. o.); s das spezifische Gewicht des Körpers; λ das spezifische Gewicht der Gewichtstücke (Messing = 8,4), so hat der Körper das Volumen $V = \frac{M}{s}$, die Gewichtstücke $v = \frac{m}{\sigma}$. Da der Auftrieb gleich dem Gewicht der verdrängten Luft ist, verliert der Körper $\lambda V = \frac{\lambda M}{s}$, die Gewichtstücke $\lambda v = \frac{\lambda m}{\sigma}$. Da die Gewichte nach Abzug dieser Verluste gleich sind, so ist

$$M\left(1 - \frac{\lambda}{s}\right) = m\left(1 - \frac{\lambda}{\sigma}\right),$$

woraus man durch Reihenentwickelung erhält:

$$M = m\left(1 + \frac{\lambda}{s} - \frac{\lambda}{\sigma}\right).$$

13. Apparate, bei denen der Luftdruck Verwendung findet. a) Variometer (Statoskop). Hefner-Alteneck hat einen Demonstrationsapparat konstruiert, der es gestattet, die Abnahme des Luftdruckes mit der Höhe schon für ein Intervall von wenigen Metern deutlich zu machen. Er besteht im wesentlichen aus einem mit Luft gefüllten Gefäß, das durch eine dünne, mit einem Flüssigkeitstropfen abgesperrte Glasröhre mit der Außenluft in Verbindung steht, aber außerdem noch eine zweite, außerordentlich feine Oeffnung hat, durch die hindurch ein Ausgleich von Druckunterschieden nur sehr langsam vonstatten geht.

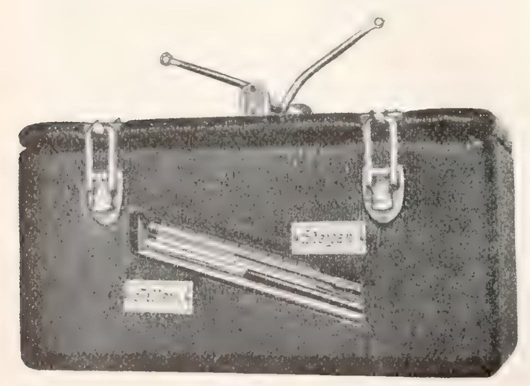


Fig. 3. Ballon-Variometer nach Bestelmeyer.

Solange der Apparat gehoben wird, herrscht vermöge der Langsamkeit dieses Ausgleiches ein Ueberdruck im Gefäß, wodurch der Flüssigkeitstropfen in der Glasröhre nach außen gedrückt wird; solange er dagegen gesenkt wird, herrscht Unterdruck, und der Tropfen wird nach innen gesogen.

Nach demselben Prinzip hat Bestelmeyer ein Ballonvariometer konstruiert (Fig. 3), das je nach der Stellung der rot gefärbten Flüssigkeit in dem engeren der beiden Glasröhrenschenkel nicht nur qualitativ erkennen läßt, ob der Ballon im Steigen oder Fallen begriffen ist, sondern auch quantitativ die vertikale Geschwindigkeit auf einer empirischen Skala direkt abzulesen gestattet.

b) Der Heber. Der Heber besteht aus einer U-förmigen Glasröhre, die mit einer Flüssigkeit gefüllt und in umgekehrter Stellung mit ihren Enden in zwei mit derselben Flüssigkeit gefüllte Gefäße gesetzt wird (Fig. 4). Die von außen auf den beiden freien Oberflächen AB und CD lastenden Luftdrucke können näherungsweise als gleich betrachtet werden (= p); strenggenommen sind sie um das Gewicht der zwischen den Flächen liegenden vertikalen Luftsäule verschieden. Für die Drucke in den oberen Enden der vertikalen Schenkel ergibt sich dann p — sh (s = spezifisches Gewicht der Flüssigkeit) im Punkte E, und p — sh′ in F. Also ist eine von E nach F wirkende Druckdifferenz im Betrage von

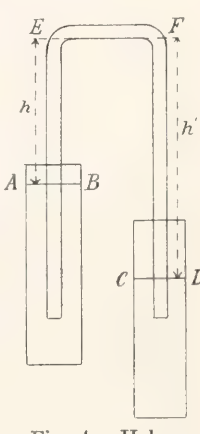


Fig. 4. Heber.

$$s\,(h' - h)$$

vorhanden, so daß die Flüssigkeit so lange von E nach F strömen muß, bis AB und CD gleiche Höhe haben.

Der Luftdruck hat beim Heber nur die Aufgabe, die Flüssigkeit in den Röhren bis zur Höhe EF hinaufzudrücken, und so ein Abreißen des Flüssigkeitsfadens zu verhindern. Indessen hat sich gezeigt, daß der Heber auch im luftleeren Raume fließt. In diesem Falle ist p = 0, es herrscht also im oberen Teil des Hebers negativer Druck (Zug), ohne daß die Flüssigkeit abreißt. Besonders große negative Drucke erhielt man bei Quecksilberhebern unter Benutzung eines Kunstgriffes; man setzte dem Quecksilber in der Röhre etwas Wasser zu, so daß die Quecksilbersäule ab und zu durch einen kurzen Wasserfaden unterbrochen war. Auf diese Weise gelang es, Vakuumheber zu konstruieren, bei denen die Flüssigkeiten im oberen Teile einem Zuge von etwa 4 Atmosphären unterworfen waren.

Die Füllung der Heberröhre geschieht meist durch Saugen am unteren Ende des längeren Röhrenschenkels. Um die Füllung zu erleichtern und den Heber auch für giftige Flüssigkeiten benutzbar zu machen (Gift-

heber, Fig. 5), bringt man nahe am unteren Ende b' noch ein Saugrohr a t an, wodurch vermieden wird, daß die Flüssigkeit mit dem Munde in Berührung kommt.

c) Stechheber. Wenn ein Trinkglas mit ebenem Rande (am besten geschliffen) ganz mit Wasser gefüllt und mit einem Stück Papier bedeckt wird, so kann man dasselbe umkehren, ohne daß das Wasser ausläuft, da der auf das Papier wirkende Luftdruck das Herabfallen der Wassermasse verhindert. Das Papier ist nur nötig, um beim Umkehren das Wasser nicht an den Seiten auslaufen zu lassen. Ist die untere Oeffnung klein genug, wie beim Stechheber (Fig. 6), so ist das Papier

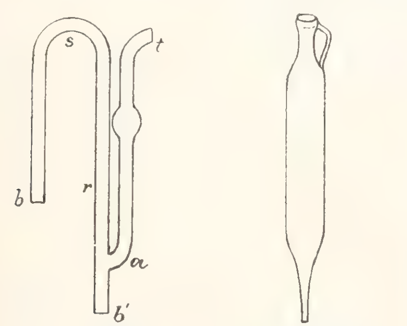


Fig. 5. Giftheber. Fig. 6. Stechheber.

nicht nötig. Der Stechheber ist auch oben offen; man läßt ihn durch Eintauchen in die Flüssigkeit sich füllen und verschließt dann mit dem Finger die obere Oeffnung. Nimmt man ihn dann aus der Flüssigkeit heraus, so läuft er erst dann aus, wenn die obere Oeffnung wieder frei gemacht wird.

d) Pumpen. Zu den Apparaten, die auf der Wirkung des Luftdruckes beruhen, sind ferner die Saugpumpen zu rechnen, bei denen der äußere Luftdruck die Flüssigkeit in dem Pumpenrohr emportreibt, wenn die Luft in seinem oberen Teil durch geeignete Vorrichtungen verdünnt wird. Die gewöhnlichen Wasserpumpen, bei denen das Rohr bis unter den Grundwasserspiegel hinabgesenkt ist, gehören hauptsächlich hierher, doch wird dasselbe Prinzip in den verschiedensten Konstruktionen verwendet (vgl. den Artikel „Wasserkraftmaschinen und Wasserhebemaschinen"). Weiter sind namentlich die Luftpumpen zu nennen (s. den Artikel „Luftpumpen").

14. Mensch und Luftdruck. Der niedrigste Luftdruck, den Menschen bisher in freilich bewußtlosem Zustande ertragen haben, beträgt 193 mm Quecksilber (Berson und Süring bei der wissenschaftlichen Hochfahrt vom 31./VII. 1901 in 10 800 m Seehöhe). Die höchstgelegenen dauernden menschlichen Ansiedelungen sind nach Hann die Minendörfer in Peru und Bolivien (S. Vincente bei Portugalete in Bolivien, Seehöhe 4580 m, Luftdruck 434 mm; in der Provinz Chichas gibt es Minen in 5310 m, die Arbeiter wohnen meist 400 m tiefer im Dorf S. Barbara) und die buddhistischen Klöster in Tibet (Kloster Hanle in Tibet, Seehöhe 4610 m, Luftdruck 435,4 mm; die Ortschaften im Seendistrikt von Ombo sollen die höchsten sein, die Goldminen daselbst liegen in 4980 m).

Normalerweise tritt in diesen Höhen die sogenannte Bergkrankheit auf (Mal de Montagne; Mountain Sickness; Punakrankheit; Soróche; Chuno). Die hauptsächlichsten Symptome sind: Angstgefühl, Schwindel, Atemnot, Muskelschwäche, rasche Ermüdung, Energielosigkeit, Gleichgültigkeit gegen Umgebung und Gefahren, ferner Nasenbluten, Herzklopfen, Kopfschmerz, zuweilen Uebelkeit bis zum Erbrechen, Mangel an Eßlust. Die Respiration ist schnell und unregelmäßig, bei größter Steigerung tritt Bewußtlosigkeit und selbst der Tod ein. Im Gebirge treten diese Symptome meist in Höhen von 3500 bis 4000 m auf (individuell sehr verschieden), bei Ballonfahrten meist bei 5 bis 6 km Höhe. Wie Paul Bert vermutet und namentlich v. Schrötter festgestellt hat, ist die Ursache der Bergkrankheit weniger die Abnahme des Luftdruckes an sich, als die dadurch verursachte Verringerung der Sauerstoffzufuhr zur Lunge. In größeren Höhen reicht der hierfür vorhandene Regulierungsmechanismus nicht mehr aus, und es tritt schon bei etwa 8000 m Höhe absolute Lebensgefahr ein. Bei Hochfahrten wird aus diesen Gründen von etwa 4000 m ab stets durch künstliche Atmung mitgebrachten reinen Sauerstoffs die Lunge hiermit versorgt, wodurch die hauptsächlichsten Krankheitssymptome zum Verschwinden gebracht werden.

Der größte Luftdruck, den der menschliche Körper zu ertragen vermag, beträgt etwa 7 Atmosphären und wird beim Tauchen in etwa 60 m Tiefe erreicht. Diese Grenze kann bei Taucherarbeiten, sei es mit der schon im Altertum bekannten Taucherglocke oder mit den modernen Taucherapparaten (Rouquairol-Denayrouze u. a.) nicht überschritten werden.

Literatur. *J. Hann, Lehrbuch der Meteorologie 2. Aufl., Leipzig 1906, Tauchnitz.* — *W. Trabert, Meteorologie, 3. Auflage, Leipzig 1909.* — *J. Hann, Handbuch der Klimatologie, 3. Auflage, 1. Bd., Allgemeine Klimatologie, Stuttgart 1908.* — *A. Wegener, Untersuchungen über die Natur der obersten Atmosphärenschichten, Physikal. Zeitschr. XII, S. 170 und 214, 1911.* — *W. Köppen, Vorschlag alle Luftdruckmessungen in allgemeinem Kraftmaß anzugeben, Meteorolog. Zeitschr. 1909, S. 198.*

A. Wegener.

Luftfahrt.

1. Statische Luftfahrt: a) Allgemeine Grundlagen. b) Die Ballongesetze. c) Freiballone. d) Fesselballone. e) Unbemannte Ballone. 2. Dynamische Luftfahrt: a) Leichter als Luft. b) Schwerer als Luft: α) Flug von Organismen. β) Kunstflug. γ) Ausführungen. δ) Motoren. ε) Propeller. c) Navigation

1. Statische Luftfahrt. 1a) Allgemeine Grundlagen. Einen Körper statisch in die Luft heben, heißt, ihm ein gleiches oder kleineres Gewicht geben, als ein gleicher Raumteil Luft besitzt. Liegt nun für den zu hebenden Körper Gewicht und Volumen fest, so läßt sich die Forderung nur erreichen, indem das Körpervolumen künstlich vergrößert wird, ohne wesentliche Erhöhung seines Absolutgewichtes. Theoretisch wäre dies durch passende Verbindung des Körpergewichtes mit einem luftleeren Hohlkörper zu machen.

Der Auftrieb wäre dann, wenn der Hohlkörper etwa Prismengestalt hätte, gleich der Differenz der beiden auf die untere und obere Prismenfläche wirkenden äußeren Luftkräfte, vermindert um das Gesamtgewicht von Körpergewicht und Hohlkörper. Selbst wenn ein hohes Evakuieren praktisch möglich wäre, so müßte jetzt mit dem vollen äußeren Luftdruck (etwa 10 000 kg/qm) gerechnet werden, so daß das Gewicht der notwendigen inneren Versteifungen den nutzbaren Auftrieb weit übersteigen würde.

Der Hohlkörper muß also mit einer Substanz ausgefüllt werden, die dem Außendruck widersteht, so daß nur geringe Druckunterschiede bestehen bleiben und eine leichte Zeughülle zur Trennung ausreicht. Zieht man in Erwägung, daß 1 cbm Wasserstoff 90 g wiegt, daß also ein Ballon üblicher Größe von 600 cbm nur 54 kg bei Wasserstoffüllung weniger trägt, als wenn das Ballonvolumen luftleer gepumpt wäre, so sieht man sofort das Zwecklose der Erfindung eines Vakuumballones ein.

Art der Füllung. Nun bedeutet das im Hohlraum befindliche Gas stets einen Verlust an Tragkraft, so daß ein geringes spezifisches Gewicht Bedingung ist. Praktisch kommen eigentlich nur Wasserstoff, Leuchtgas und in neuerer Zeit auch Leichtgas in Frage.

Bei 0° und 760 mm Hg-Säule wiegt 1 cbm Luft 1293 g; dann ergibt sich ein Auftrieb

für chemisch reinen Wasserstoff von			1203 g
,, technischen Wasserstoff		,,	1100—1200 g
,, Leichtgas		,,	1000 g
,, Leuchtgas je nach dem Ort		,,	670— 820 g
,, erwärmte Luft von	100°	,,	348 g
	80°	,,	294 g
	60°	,,	233 g
	40°	,,	166 g
	20°	,,	88 g

In der Praxis vorkommende Füllgase. Leuchtgas, in fast allen größeren Orten zu mäßigem Preise zu haben, dient wohl den meisten Freifahrten als Traggas; Leichtgas wird jetzt von der Dessauer Gasgesellschaft besonders für Luftschiffahrtszwecke aus dem gewöhnlichen Leuchtgas durch Zersetzung der schweren Kohlenwasserstoffe hergestellt, wird sonst aber kaum verwendet; Wasserstoff findet eine immer wachsende Benutzung, zumal er an vielen Stellen als Nebenprodukt verhältnismäßig billig abgegeben werden kann.

Durch passende Mischung von Wasserstoff und Leuchtgas oder Wasserstoff und Luft lassen sich bei gegebenem Ballonvolumen die verschiedensten Variationen für den Auftrieb herstellen.

Bei Freifahrten wird Wasserstoff wohl nur dann benutzt, wenn die Füllung gerade am Gestehungsorte vorgenommen werden soll; im Gegensatz hierzu ist er bei wissenschaftlichen Beobachtungsballonen und lenkbaren Luftschiffen unbedingt notwendig, weil es in beiden Fällen auf die Erreichung des größtmöglichen Auftriebs ankommt, wenn derselbe auch durch größere Kosten erkauft wird.

Aufbewahrung und Transport der Gase. Der Wasserstoff muß meist von seinem Entstehungsorte zum Füllplatz geschafft werden und um dies einigermaßen ökonomisch vorzunehmen, wird er in Stufenkompressoren auf hohen Druck (200 Atmosphären) verdichtet und in Stahlflaschen umgefüllt.

Erstere bestehen aus einer Reihe hintereinander gekuppelter Zylinderpressen, von denen jede ihren bereits verdichteten Inhalt an die nächste weitergibt, die dann ein nochmaliges Komprimieren vornimmt. In den Stahlflaschen kann der Wasserstoff beliebig verschickt und auch lange Zeit ohne Verluste aufbewahrt werden. Ein Abfüllen geschieht dann derart, daß mittels eines Reduzierventils das hochgespannte Gas unter geringerem Druck in ein Sammelrohr tritt und von hier aus durch einen Füllschlauch zum Ballon geleitet wird.

Einfluß der Luft. Außer dem spezifischen Gewicht des Traggases bestimmt auch das Raumgewicht der Luft in erheblichem Maße den freien Auftrieb des Ballones; der Gewichtsunterschied dieser beiden Gase bzw. Gemische kommt also für sämtliche Fragen in Betracht, so daß wir es stets mit den Hauptsätzen der Gaszustandsgleichungen zu tun haben.

Hierbei soll die atmosphärische Luft und der im Sättigungszustand in ihr befindliche Wasserdampf stets als Gas behandelt werden, auch bezüglich der Diffusion und Penetration.

Die Zustandsgleichung lautet

$\frac{p \cdot v}{T} = \frac{p_0 \cdot v_0}{273} = R$, worin p = Druck (in kg/m²),

p_0 = Druck einer Atmosphäre = 760 mm Hg = 10 333 kg/m²,

v = spezifisches Volumen, also Volumen eines cbm Gas in kg.
v_0 = spezifisches Volumen, wenn $p = p_0$ und $t = 0^0$,
$T = a + t$, wobei t = Temperatur in C⁰,
$\frac{1}{a} = \alpha = \frac{1}{273} = 0{,}003\,665$,
$\gamma = \frac{1}{v}$ = Masse eines cbm Gas, $\gamma_0 = \frac{1}{v_0}$.

Die weiteren Folgerungen aus diesem Hauptgesetz sollen hier nicht erörtert werden (vgl. die Artikel „Gasbewegungen" und „Atmosphäre"); alle näheren Ueberlegungen werden vielmehr nur im engsten Anschluß an die Praxis gemacht und daher nur die gebräuchlichen Ballone besprochen.

1b) Die Ballon-Gesetze. Montgolfieren und Rozieren (d. s. reine Warmluftballone und deren Kombinationen mit Gasballonen) dienen lediglich artistischen Zwecken; in der Praxis kommen nur Gasballone mit verschiedenen Füllgasen vor, die sich wieder in Freiballone mit und ohne Ballonet, in Fesselballone und Fallschirmballone teilen.

Nach Möglichkeit wird dem Ballon die Kugelform zugrunde gelegt, die bei kleinster Oberfläche den größten Inhalt hat; kann aber diese Form mit Rücksicht auf ihren großen Luftwiderstand nicht beibehalten werden, so wird fast stets ein gestreckter Umdrehungskörper benutzt.

Die auf einen Kugelballon wirkenden statischen Kräfte werden folgendermaßen festgesetzt: Tragkraft einer Gasmasse sei stets ihr Auftrieb (Gewicht der verdrängten Luft) vermindert um das Gasgewicht. Dieser nach oben gerichteten Tragkraft K wirkt die Summe der Gewichte von Ballon, Ballast, Insassen und deren Gepäck entgegen, das Gesamtgewicht G; die Differenz von K—G ergibt dann die Steigkraft S. Alle übrigen den Ballon irgendwie bewegenden Kräfte seien vorläufig unter dem Begriff „Luftwiderstand" zusammengefaßt.

Schlaffer und praller Ballon. Bei der Betrachtung des Auf- und Absteigens des Ballones müssen wir zunächst zwei Hauptgruppen von Umständen unterscheiden, die verschiedenen Gesetzen in der Luft unterliegen. Sie sind deshalb von großer Wichtigkeit, weil jeder Ballon während der Fahrt beide Arten in beliebiger Häufigkeit durchläuft. Diese Gruppen umfassen zunächst den Ballon mit unveränderlichem Gasgewicht, gemeinhin bei Freifahrten der „schlaffe" Ballon genannt; dann den Ballon mit unveränderlichem Gasvolumen, in derselben Sprechweise der „pralle" Ballon.

Diesen Hauptgruppen schließen sich noch die Ballone mit konstantem Gasgewicht und konstantem Gasvolumen einerseits und endlich die Ballone mit veränderlichem Gasgewicht und veränderlichem Gasvolumen an. Diese beiden Arten kommen für die statische Luftfahrt kaum in Betracht, werden jedoch bei der dynamischen Luftfahrt eingehender erwähnt. Die Worte „schlaff" und „prall" decken nicht ganz die Eigenart einer Gruppe. Konstantes Gasgewicht hat ein Freiballon so lange, bis der Gasinhalt seine Hülle bis Unterkante Füllansatz ausfüllt; steigt der Ballon weiter, dehnt sich auch das Gas mehr aus, so hat er konstantes Gasvolumen, ist also prall; das geringste Fallen bringt ihn aber wieder in die erste Gruppe zurück.

Die Tragkraft K. Beim prallen Ballon bleibt das Volumen konstant, also soll die Volumen-Einheit der Rechnung zugrunde gelegt werden. Nach vorigem ist $v = \frac{1}{\gamma} = \frac{1}{g.\varrho}$; $p.v = \frac{p}{g.\varrho} = R.T$; führen wir jetzt als spezifisches Gewicht des Gases das Verhältnis der Gewichte gleicher Volumina Gas und Luft bei gleichem p und T ein: $s = \frac{\varrho_1}{\varrho} = \frac{R}{R_1}$, so ist K für 1 cbm $= g\,(\varrho - \varrho_1) = \frac{p}{R.T} - \frac{p_1}{R_1.T_1}$ und da beim Ballon $p = p_1$, so ergibt sich $K = \frac{p}{R.T} \cdot \left(1 - \frac{R}{R_1} \cdot \frac{T}{T_1}\right) = \varrho \left(1 - s \cdot \frac{T}{T_1}\right)$. Von Emden wurde vorgeschlagen, Normalzahlen aufzustellen, die für die Vergleichsrechnungen und Ueberschläge von gutem Nutzen sind; so versteht man zunächst unter der Normaltragkraft K die Tragkraft bei $T = 273^0$, wenn Gas und Luft unter 760 mm Druck stehen; da γ dann = 1,293 kg, so ist $K_0 = 1{,}293\ (1 - s)$ kg.

Wichtig ist noch die Normalhöhe eines Ballones, d. h. jener Punkt, bei dem Gleichgewicht herrschen würde, wenn für Gas und Luft $T = 273^0$. Ziehen wir nun die genäherte barometrische Höhenformel hinzu: $h_0 = 18\,400 \log \frac{p_0'}{p'}$, bei der h_0 irgendeine Höhe in m, p_0' den Luftdruck unten, p' denselben oben in mm Hg bedeuten, nennen den Quotienten $\frac{p_0'}{p'} = n$ die Höhenzahl, so ergibt sich aus den obigen Formeln die Tragkraft $K = K_0 \cdot \frac{1}{n}$.

Soll Gleichgewicht herrschen, muß $V.K = G$ sein, folglich ist die Normalhöhe $h_0 = 18400 . \lg . \frac{V.K_0}{G}$.

Bei genaueren Rechnungen muß noch das Temperatur-, Feuchtigkeits- und Schwereverhältnis berücksichtigt werden, wodurch die Formel recht kompliziert wird.

Um nun die Abmessungen des Ballones einführen zu können, soll die Belastung in

das Ballongewicht G und die sonstige Last L getrennt werden; G kann passend durch O.m ersetzt werden, wenn m das Gewicht von 1 qm der Oberfläche und O die Oberfläche ist.

Da nun L mehr oder weniger willkürlich ist, so rechnet man zweckmäßig erst mit dem unbelasteten Ballon; der belastete Ballon kann nur eine entsprechend tiefere Normalhöhe h_b erreichen, hat also auch eine andere Höhenzahl n_b.

Zunächst der unbelastete Ballon: $h_1 = 18400 \lg. \frac{V.K_0}{G_1}$

$V = \frac{4}{3} r^3 \pi$; $G_1 = O.m = 4 r^2 \pi.m$

also $n = \frac{K_0}{m} \sqrt[3]{\frac{V}{36.\pi}}$; wird dies in die Gleichung der Normalhöhe eingeführt, so ergibt sich:

$$h_0 = 18400.\lg \frac{K_0}{m} \sqrt[3]{\frac{V}{36.\pi}}$$

$$= 18400.\lg \frac{K_0}{\sqrt[3]{36.\pi}} + \frac{1}{3}.18400.\lg \frac{V}{m^3}$$

In diesem Ausdruck ist das erste Glied unabhängig vom Ballon und bei bestimmtem Gas konstant; das zweite Glied zeigt, daß die Normalhöhe nur abhängig ist vom Verhältnis $\frac{V}{m^3}$, welcher Wert nach dem französischen Oberst Renard die Charakteristik des Ballones heißt. Da m als Ausdruck für das Gewicht aufzufassen ist, so wird das Gewicht gleichgroßer Ballone ihrer Normalhöhe umgekehrt proportional sein, oder, da die Normalhöhe von einer bestimmten Höhenzahl abhängt, auch umgekehrt proportional dieser Höhenzahl. Der bisher in Rechnung gesetzte und der wirkliche Ballon unterscheiden sich der Voraussetzung gemäß nur durch das Gesamtgewicht, also muß sein:

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{O.m + L}{O.m}; \quad n_2 = \frac{n_1.O.m}{O.m + L}$$

$$= \frac{n_1}{1 + \frac{L}{O.m}}$$

folglich ergibt sich für jeden belasteten Ballon die Normalhöhe h_b

$$h_b = h_2 = 18400.\lg \frac{n}{\frac{L}{O.m} + 1}$$

sie ist demnach vom Volumen und Auftrieb des Füllgases sowie vom Gesamtgewicht abhängig.

Beim schlaffen Ballon bleibt das Gasgewicht konstant, also errechnen wir die Kräfte für die Gewichtseinheiten des Gases. Bei beliebigem Druck und Temperatur wiegt 1 cbm Gas $= \gamma'$ kg; 1 kg Gas hat also das Volumen $\frac{1}{\gamma'}$ cbm; 1 cbm Luft unter sonst gleichen Bedingungen muß nach den Voraussetzungen $\frac{\varrho}{\varrho'}$ mal soviel wiegen; also ist die Normaltragkraft von 1 kg Gas bei gleicher Temperatur mit der Luft $\mathfrak{K} = \frac{\varrho}{\varrho'} - 1$ kg; nun ist $s = \frac{\varrho'}{\varrho}$, folglich $\mathfrak{K} = \frac{1}{s} - 1 = \frac{1-s}{s}$ kg.

Ein Ballon von Q kg Gas hat also eine Normaltragkraft von $\frac{Q}{s}(1-s)$ kg; d. h. solange Gas und umgebende Luft gleiche Temperatur besitzen, bewegt sich ein schlaffer Ballon mit konstanter Tragkraft.

Würde ein solcher Ballon gerade mit dieser Normalkraft belastet, so müßte er in jeder Höhenlage im Gleichgewicht schweben, ihm kommt als keine Normalhöhe zu; ist aber die Belastung zu klein, so wird er steigen und von einer bestimmten Höhe ab Gasaustritt erfolgen; dann bleibt das Volumen konstant und die Normalhöhe bestimmt sich nach der erstbeschriebenen Art.

Die Steigkraft sollte nach vorigem die Differenz von Tragkraft und Gesamtgewicht bilden; $S = K - G$. Beide Glieder der rechten Seite sind veränderlich; auf K wirkt zunächst der Gasaustritt bei Überschreitung der Prallhöhe ein, dann die Diffusion des Gases durch die Hülle hindurch, ferner Gasauslaß durch Ventilziehen. Letzteres, sowie die Veränderung von G durch Ballastwurf sind im Gegensatz zur Gasdiffusion als willkürliche Änderungen der Steigkraft zu bezeichnen, die gänzlich in der Hand des Führers liegen.

Nach Möglichkeit wird dieser nun versuchen, den Ballon in der Nähe einer Gleichgewichtszone zu halten, so daß $K = G$ wird.

Ballastwurf. Rechnerisch festlegen läßt sich nur der Ballastwurf. Ist für die Normalhöhe h_1 eines Ballons die Höhenzahl $n_1 = \frac{V.K_0}{G}$, so würde ein Ballastwurf von g' eine neue Höhe h_2 mit einer entsprechenden Höhenzahl $n_2 = \frac{V.K_0}{G-g'}$ ergeben. Nun verhalten sich aber die Gewichte gleichgroßer Ballone umgekehrt wie ihre Höhenzahlen, also $\frac{n_1}{n_2} = \frac{G-g'}{G} = \frac{1-g'}{G}$; die Höhendifferenz $h_2 - h_1$ ist demnach

$$= 18400.\lg.\left(1 - \frac{g'}{G}\right).$$

Wird jetzt der log nat angewendet, so ergibt sich $h_2 - h_1 = 8000.\log \text{nat}\left(1 - \frac{g'}{G}\right)$.

Solange g' nur einen kleinen Teil des Gesamtgewichts (max. 10%) ausmacht, kann man setzen $h_2 - h_1 = 8000 \cdot \frac{g'}{G}$; wir erhalten als Gesetz für den Ballastwurf: die Normalhöhe eines Ballones ändert sich um 80 m, so oft das Gesamtgewicht um 1% verringert wird, unabhängig von Volumen, Füllung und Höhe, in welcher dies geschieht.

Ist nun das Gesamtgewicht vor der Fahrt bestimmt und werden die Ballastsäcke stets $= g'$ abgewogen, so ist mit einiger Sicherheit der Einfluß des Ballastwurfes vorherzusagen.

Temperatureinfluß (Tag- und Nachtfahrt). Bisher war stets die Annahme zugrunde gelegt, daß Füllgas und Luft die Temperatur $t = 0^0$ hätten; wir müssen diese Annahme jetzt dahin modifizieren, daß entweder beide eine gleiche aber von 0^0 verschiedene Temperatur haben, oder aber daß zwischen Gas und Luft außerdem noch eine Temperaturdifferenz besteht. Im ersteren Fall ändert sich die Tragkraft einer Gasmasse um $\frac{t^0}{273}$ ihres Wertes, so oft sich die für Luft und Gas gleiche Temperatur um t^0 im entgegengesetzten Sinne ändert. Besteht aber zwischen Gas und Luft eine Temperaturdifferenz $\pm \varDelta t^0$, so ändert ein konstantes Gasvolumen seine Tragkraft um $\pm \varDelta t^0 . \frac{1}{273}$ des Gasgewichtes; ein konstantes Gasgewicht ändert im gleichen Fall seine Tragkraft um $\pm \varDelta t^0 . \frac{1}{273}$ seines Auftriebes. Somit müssen wir jetzt die vorhin aufgestellte Formel für die Normalhöhe mit Rücksicht auf die Temperatureinflüsse berichtigen.

Temperatureinfluß beim prallen Ballon. Beim Ballon mit konstantem Volumen ändert sich die Tragkraft um $\frac{1}{273}$ im entgegengesetzten Sinne ihres Wertes, so oft die für Luft und Gas gleiche Temperatur um 1^0 zu- oder abnimmt. Befindet sich also der Ballon bei 0^0 im Gleichgewicht ($K_0 = G$), so beträgt die Zunahme der Tragkraft $\varDelta G = -\alpha . t^0 . G$ kg bei t^0 Temperaturzunahme; nach der obigen Ballastwurfformel würde dies aber einer Änderung der Normalhöhe $\varDelta h = -8000 . \alpha . t$ entsprechen. Setzen wir jetzt $\alpha . 8000 = \sim 30$, so erhalten wir dadurch das Gesetz: die Gleichgewichtshöhe eines Ballones ändert sich in jeder Höhenlage um $\sim \mp 30$ m, so oft Luft- und Gastemperatur gleichmäßig um 1^0 zu- oder abnehmen, unabhängig von Größe und Gewicht des Ballones, jedoch unter der Voraussetzung, daß es sich um einen prallen Ballon handelt. Werden die Temperatureinflüsse bei der Gleichung der Normalhöhe berücksichtigt, so ergibt sich die wirkliche Gleichgewichtshöhe eines Ballones zu $h_g = h_0 - 8000 . \alpha . t - 8000 . \frac{s}{1-s} . \frac{t'-t}{273+t}$, wobei $t'-t$ der Temperaturüberschuß des Gases über die Luft bedeutet.

In dieser Gleichung entspricht das zweite Glied der rechten Seite wieder dem runden Wert 30 m, im letzten kommen die Bestrahlungseinflüsse auf das Gas zum Ausdruck. Da die Gleichung nun hauptsächlich vom spezifischen Gewicht beherrscht wird, so ersehen wir bei Hinzuziehung der spezifischen Gewichte von Leuchtgas und Wasserstoff, daß ein mit ersterem gefüllter Ballon ungefähr elfmal so empfindlich gegen Aenderungen der Gastemperatur ist als ein Wasserstoffballon, sowohl, was seine Tragkraft anbelangt als auch die Erreichung seiner Gleichgewichtslage.

Temperatureinfluß beim schlaffen Ballon. Der Ballon mit konstantem Gasgewicht schwebt so lange im indifferenten Gleichgewicht, solange zwischen Gas und Luft die gleiche Temperaturdifferenz bleibt, er kann also beliebig das ganze Höhenintervall durchlaufen, das ihm ohne Gasablaß zur Verfügung steht. Nach Annahme stehen Gas und Luft unter gleichem Druck, also hat jedes kg Gas eine Tragkraft von $\frac{1-s}{s}$ kg; werden Q kg in die Hülle eingefüllt, so ist die Tragkraft dieser Gasmasse $\mathfrak{K}_0 = \frac{Q}{s}(1-s)$ kg; darin bedeutet $\frac{Q}{s}$ das konstant bleibende Gewicht der verdrängten Luft also den Auftrieb. In der Normalhöhe eines Ballones soll das Gas bei der Temperatur 0^0 für Luft und Gas den größten in der Hülle verfügbaren Raum V gerade ausfüllen. Bei gleichmäßiger Temperaturänderung erfährt das Volumen eine Aenderung um $V . \alpha . t^0$, so daß sich nach vorigem für die wirkliche Prallhöhe ein vertikaler Abstand von ± 30 m für $\pm t^0$ von der Normalprallhöhe ergibt. Erhält jetzt das Gas eine Temperaturdifferenz $\pm \varDelta t^0$ gegen die umgebende Luft, so folgt daraus eine Tragkraftänderung $\varDelta \mathfrak{K}$ kg $= \pm \frac{Q}{s} . \alpha . \varDelta t^0$. Nun ist $\frac{Q}{s}$ ein konstanter Quotient, unabhängig von der Art der Füllung, also haben Temperaturänderungen von Gas gegen die Luft bei beliebiger Füllung gleichen Einfluß, solange der Ballon als schlaffer fährt. Schwebt daher ein Ballon prall in seiner Gleichgewichtslage, so haben Gasabkühlungen einen viel größeren Einfluß auf ihn als Erwärmungen, weil der Ballon im ersten Fall ein schlaffer wird und dann obiges Gesetz in Kraft tritt.

Luftwiderstand. Für den unter 4 erwähnten Luftwiderstand ergibt sich mit großer Annäherung die ein-

fache Formel $W = \frac{D^2 . v^2}{32 . n}$, wobei D der Ballondurchmesser, n die Höhenzahl, v die Bezugsgeschwindigkeit gegen die umgebende Luft und W der Luftwiderstand; $\frac{D^2}{32 . n} = w$ gesetzt gibt die einfache Form $W = w . v^2$. Diese vereinfachte Form folgt aus dem Ansatz für den Widerstand $W = 0{,}22 . \frac{\gamma}{g} . F . v^2$, worin F dem Querschnitt des Ballones senkrecht zur Bewegungsrichtung entspricht, g = der Schwerebeschleunigung ist; γ nimmt nun nach folgendem Gesetz mit der Höhe ab: $\gamma - \gamma_0 . e^{\frac{h}{H}}$; worin H die Höhe der homogenen Atmosphäre, h die augenblickliche Höhe, e den natürlichen Logarithmus bedeutet und γ_0 sich auf die Ausgangshöhe bezieht.

Fehlen nun vertikale Beschleunigungen, so wird S = W sein; da der Beschleunigungsvorgang ziemlich rasch vor sich geht, stellt sich bald nach dem Aufstieg des Ballons ein konstantes v ein.

Praktisch kommt dieses Gesetz in Frage, wenn die Ballastmenge berechnet werden soll, um einen Ballon von bekanntem Volumen, der mit konstanter Geschwindigkeit v aus einer bestimmten Höhe fällt, abzubremsen; der Bremsballast muß eine Steigkraft erzeugen, welche die Fallgeschwindigkeit aufhebt, diese ist aber gleich dem Luftwiderstand W, also W = S = Bremsballast $= \frac{D^2}{32 . n} . v^2$ kg.

Vergleich verschiedener Ballone. Sind die Normaltragkräfte zweier gleich großer Ballone mit ungleicher Füllung K_1 und K_2, so ergeben sich die entsprechenden Normalhöhen bei den zugehörigen Höhenzahlen n_1 und n_2

$$n_1 = \frac{V}{G} . K_1; \quad n_2 = \frac{V}{G} . K_2;$$

der Höhenunterschied beider folgt also aus der neuen Höhenzahl n zu: $\Delta h = 18400 . \lg \frac{K_1}{K_2}$ ist also konstant (abgesehen von Temperatureinflüssen), unabhängig von Gewicht und Größe der Ballone, nur abhängig von der Füllung. Ungleichgroße, aber gleich schwere und mit gleicher Füllung versehene Ballone, haben ihren Volumen V_1 und V_2 entsprechende Höhenzahlen

$$n_1 = V_1 . \frac{K}{G}; \quad n_2 = V_2 . \frac{K}{G}$$

Ihr vertikaler Abstand ergibt sich aus der neuen Höhenzahl $\Delta h = h_1 - h_2 = 18400 . \lg \frac{V_1}{V_2}$ d. h. abgesehen von Temperatureinflüssen ist der Vertikalabstand dieser Ballone nicht vom Gewicht oder der Füllung, sondern nur vom betreffenden Volumen abhängig.

Poeschelring und Ballonet. Zwei weitere Einrichtungen für Freifahrten sind: 1. Das Ballonet. Ein Luftsack wird in die untere Kalotte eingebaut, um bei geschlossenem Füllansatz Aenderungen des Gasvolumens durch Einblasen oder Ablassen von Luft auszugleichen. Dadurch läßt sich jede beliebige Höhenlage erreichen und erhalten, was bei geschickter Ausnutzung der herrschenden Winde einer Distanzfahrt sehr dienlich sein kann; irgendeine Ballastersparnis ist dagegen niemals durch das Ballonet zu erlangen. 2. Der Poeschelring. Er verfolgt den Zweck, den Füllansatz des sinkenden Ballones unter allen Umständen offen zu halten, so daß die Luft eintritt und einmal die äußere Form der Hülle erhält, sich dann aber auch mit dem Füllgase mischt. Wird nun der Ballon durch Ballastwurf abgefangen, nachdem schon eine Mischung von Gas und Luft stattgefunden hat, so wird er, weil sich ja die Tragkraft der Mischung zu der des ursprünglichen Füllgases verringert hat, nicht in seine vorherige Höhe zurückkehren, sondern wie ein praller Ballon steigen; die nachteiligen Folgen des Ueberwerfens werden demnach zwar vermieden, aber auf Kosten der erreichbaren Höhe.

Fahrtechnik. Um das durch irgendwelche Ursachen eingeleitete Sinken eines Ballones vollständig abzubremsen, ist stets eine größere Ballastmenge notwendig als der Sinkkraft entspricht, es tritt daher auch kein Stillstand ein, sondern der Ballon kehrt um und geht in seine neue Gleichgewichtshöhe.

Jeder Ventilzug, jede Belastung durch atmosphärische Einflüsse, jede Gleichgewichtsstörung überhaupt, führt also am letzten Ende durch Ueberwerfen zu einer Erhöhung der Gleichgewichtslage und die Kunst der Ballonführung besteht nun darin, in möglichst langsamer Steigung nach möglichst langer Zeit (bei Einbehaltung des Bremsballastes für die Landung) die größte Höhe zu erreichen; ist der Ballon auf dieser Höhe einmal angelangt, so ist die eigentliche Fahrt beendigt, denn nach kurzer Zeit sinkt der Ballon und die Landung ist nicht mehr aufzuschieben. Mit Ausnahme der Höhenfahrten ist alle Geschicklichkeit darauf zu verwenden, eine möglichst lange Fahrtdauer zu erzielen; diese ist nun wieder vom Ballastverbrauch abhängig, während die Art der Füllung ohne Einfluß ist. Lediglich in bezug auf das Ueberwerfen tritt die Ueberlegenheit des Wasserstoffballons zutage, weil sich (wie wir vorhin sahen) die Ballastgabe durch ihr Verhältnis zur Belastung bemißt, das aber nach den spezifischen Gewichten bei Wasserstoff einen um 70 % günstigeren Wert ergibt. Um nun über die Art und Größe der Vertikalbewegungen des Ballones orientiert zu sein (Horizontalbewegungen kommen für Freifahrten ja nicht in Betracht), bedarf der Führer einiger Instrumente, die selbsttätig diese Bewegungen angeben.

Zum Messen der jeweiligen Höhenlage

dient ein Aneroidbarometer oder ein Barograph: Bewegungen gegen die Luft können durch ausgeworfene Papierstückchen geschätzt werden; einen genauen Anhalt bietet jedoch die gleichzeitige Beobachtung von Vertikalanemometer und Variometer. Erstgenanntes, ein Flügelrädchen mit senkrechter Achse, gibt stets die Relativbewegung zur umgebenden Luft an, letzteres, das die Aenderungsgeschwindigkeit des Luftdrucks anzeigt, gibt die Geschwindigkeit relativ zum Erdboden; gleichzeitige Ablesung beider läßt also sofort erkennen, ob der Ballon absolut steigt oder fällt, ob er von einem auf- oder absteigenden Luftstrom mitgenommen wird oder aber, ob er sich relativ zu einem solchen bewegt.

In jedem Einzelfall ist der Führer in der Lage, sofort bei Beginn einer Bewegungsumkehrung Gegenmaßregeln zu ergreifen, die in diesem Augenblick noch verhältnismäßig einfach sind.

1c) Freiballon. Seine wichtigsten Teile sind Hülle mit Ventil und Reißleine, Netz mit Ballonring, Korb mit Schleppseil, Anker, Ballast.

Hülle. Anzustreben ist die größtmöglichste Differenz zwischen dem Eigengewicht und dem Gewicht der verdrängten Luft, daher muß die Hülle zunächst eine Form erhalten, die bei geringster Oberfläche das größte Volumen enthält, weiter muß sie geringstes Einheitsgewicht haben, also große Beanspruchung zulassen und aus diesem Grunde und mit Rücksicht auf die Dichtigkeit möglichst wenig Nähte enthalten, was wiederum durch geeignete Zuschnittmuster zu erreichen ist. Für die Beanspruchung der Hülle ist der innere Druck des Füllgases ausschlaggebend, der mit der Höhe der Gassäule steigt. Der Maximaldruck wird $Q = K (D + l)$ kg, darin ist D der Durchmesser des Ballons, l die Länge des Füllansatzes und K die Tragkraft von 1 cbm des Gases.

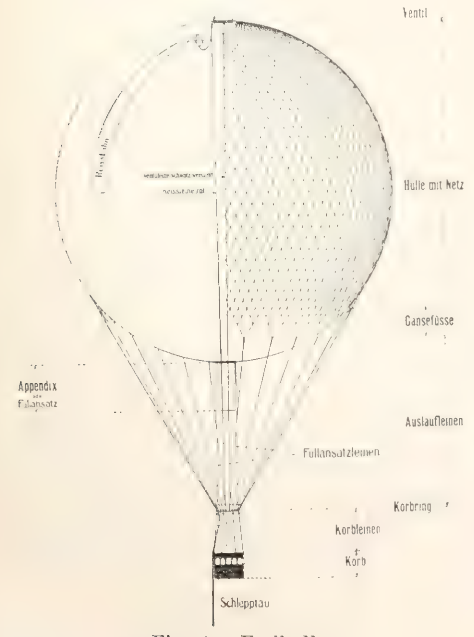


Fig. 1. Freiballon.

Für diesen Druck kommt nun die Gasmasse in Betracht, die sich aus dem Inhalt der oberen Ballonhälfte und einem Zylinder von der Grundfläche des größten Ballon-Horizontalquerschnittes und der Höhe $D/2 + l$ zusammensetzt; der sich ergebende Gesamtdruck muß vom Aequator aufgenommen werden, wobei jedoch zu berücksichtigen ist, daß das Netz einen Gegendruck auf die Höhe ausübt.

Bei Freiballonen wird der zulässigen Beanspruchung eine 15 bis 20 fache, bei Fesselballonen eine mehr als 20 fache, bei Registrierballonen eine 2 fache Sicherheit zugrunde gelegt. Dies geschieht im Hinblick darauf, daß die Beanspruchung der Hülle beim Füllen, Verpacken und Ueberholen eine wesentlich größere ist als während der Fahrt; z. B. kann aus Versehen der Gashahn beim Füllen geöffnet bleiben, nachdem der Ballon schon prall ist, so daß der volle Leitungsdruck auf die Hülle wirkt oder der Ballon wird mit zugebundenem Füllansatz in der Sonne stehen gelassen, was bei einer Erwärmung des Gases um 30° schon einer Volumenzunahme von $0{,}003\,663 \cdot 30° =$ rund 11 % entspricht. Neben dieser Festigkeit ist möglichste Dichtigkeit Hauptbedingung, deshalb werden die Baumwoll- und Seidengewebe mit Firnis oder Kautschuk getränkt.

Firnis hat den Vorteil der einfachen Ausführbarkeit, ist auch anfangs leichter, die gefirnisten Stoffe sind aber den Anstrengungen des Felddienstes nicht gewachsen, zumal sie einer steten Beobachtung bedürfen.

Goldschlägerhaut wäre ihres geringen Gewichtes wegen sehr geeignet, bedarf aber zu großer Aufmerksamkeit und ist zu teuer.

Ventil und Reißbahn in der Hülle sollen sich in ihren Funktionen ergänzen; das Ventil erzeugt durch Gasablaß eine Verminderung der Steigkraft, vermindert also die Höhenlage und kann schließlich zur Landung führen; bei dieser letzten Funktion wird es durch die Reißbahn unterstützt. Die Reißbahn besteht aus einem langen schmalen Schlitz in der oberen Kalotte der Hülle, der durch einen Stoffstreifen überklebt ist.

Bisweilen wird dieser Stoffstreifen außer durch Gummilösung auch durch Druckknöpfe mit der Hülle verbunden.

Diese Reißbahn wird nun im geeigneten Augenblick von der Hülle abgerissen, so

daß durch die große Oeffnung eine schnelle Gasentleerung erfolgt. Das Ventil wird an der höchsten Stelle des Ballones angeordnet, weil hier durch den Druck der ganzen Gassäule die größte Austrittsgeschwindigkeit des Gases gewährleistet ist. Diesem höchsten Gasdruck entsprechend muß es eine sichere Dichtung bieten, nach einem Ventilzug sofort wieder gut schließen und in jeder Beziehung absolut verläßlich sein. Das führt von selbst zu einer möglichst einfachen Konstruktion; irgendwelche Holzringe mit einem Belag von Kautschukplatten oder -Schläuchen werden durch Gummischnüre oder durch Federdruck zusammengehalten und nur durch Leinenzug geöffnet. Ist keine Reißbahn vorgesehen, so muß außer dem *Manövrierventil* noch ein *Entleerungsventil* angeordnet werden. Stets müssen die betreffenden *Leinen* der Einzelorgane auffällig voneinander unterschieden sein; beim Aufstieg ist auf den genügend großen Durchgang derselben zu achten, damit eine Ausdehnung des Ballones nicht einen selbsttätigen Gasauslaß hervorruft. Die Reißleine geht vom oberen Ende der Reißbahn erst zu einer Klinke am Ventil, so daß der erste Zug nur diese Klinke löst, erst dann kann ein Reißen erfolgen.

Das Netz hat die Aufgabe, die Belastung des Ballones gleichmäßig auf die Hülle zu übertragen, so daß Zugspannungen vermieden sind, und außerdem der Hülle eine größere Festigkeit gegen die Gasspannungen zu verleihen. Das eigentliche Netzhemd beginnt beim Ventilring, umschließt in großen Maschen die Hülle und endigt vermittels mehrerer „*Gänsefüße*" in 16 bis 24 Auslaufleinen, die mittels Knebel am Korbring leicht lösbar befestigt sind. Dimensioniert werden die einzelnen Leinen mit zehnfacher Sicherheit nach ihren Beanspruchungen. Unterhalb des Aequators wird in das Netz das Haltenetz eingeflochten, an dessen unterste Spitzen die *Halteseile* angeknebelt werden können.

Beim sogenannten *Rautennetz* ergeben sich infolge der vielen Knoten starke Reibungsbeanspruchungen der Hülle, besonders wenn ein nasses Netz sich beim Trocknen verlängert; *Finsterwalder* sucht dies durch das sogenannte *Meridiannetz* abzumildern, das in der Hauptsache aus vertikalen Seilen besteht, die an der oberen Kalotte zusammengefaßt werden, so daß nur wenige Verbindungsknoten nötig sind.

Bei starken Ballonstoffen wird mit der Hülle ein *Gurt* verklebt und vernäht, von dem aus die Befestigungs- und Halteleinen ausgehen, so daß sich ein Netz erübrigt. Der *Korbring* soll die weit auseinanderliegenden Befestigungsleinen gewissermaßen einschnüren, er wird entweder aus nahtlosem Stahlrohr oder aus bestem Holz gefertigt, stets aber gut mit Bindfaden umwickelt; vom Ring aus gehen nach oben die Knebel für die vorerwähnten Auslaufleinen, nach unten acht Leinen direkt zum Korb.

Das Schleppseil wird am Korbring so befestigt, daß bei der Landung die Reißbahn stets oben zu liegen kommt. Dieses Schleppseil wird häufig aus Seilen verschiedener Stärke zusammengesetzt, der untere Teil von größerem Gewicht und Durchmesser ist durch ein nicht ganz so schweres Seil mit dem Korbring verbunden. Seine Länge beträgt nicht unter 80 bis 100 m, das Gewicht ungefähr $^1/_{50}$ der Steigkraft; vielfach erhalten die Schleppseile durch Umwickelung oder durch Einlagen von Kork eine gewisse *Schwimmfähigkeit*, um den Ballon beim Kreuzen von Wasserarmen nicht zu sehr zu belasten.

Seltener gebräuchlich sind *Anker* bei Freifahrten; sie sind bisher in der Art ausgeführt, daß sie sich entweder mehrmaulig oder in Form von Gliederankern auf den Boden auflagern. Für Ueberwasserfahrten werden *Sackanker* oder mit Blei ausgefüllte *Schwimmer* benutzt, welche die Fahrt nicht allzu sehr hindern, aber wegen ihrer Schwere ein Entfernen vom Wasser unmöglich machen, ähnlichen Zwecken dienen besondere *Zellensysteme*, die im Wasser nachgezogen werden müssen.

Alle diese Vorrichtungen haben den Nachteil, daß sie unbedingt den Bewegungen der Wasseroberfläche folgen und daher bei unruhigem Wetter ein fortwährendes Zerren am Schleppseil hervorrufen.

Der Korb besteht aus einem starken Weidengeflecht mit Rohrverstärkungen, die Tragleinen laufen stets unter dem Boden durch, Klappsitze und eventuell eine aufklappbare Ruhebank bei Dauerfahrten sowie mehrere Leinen zum Anbinden und Verstauen der sonst in den Korbleinen hängenden Instrumente und sonstigen Gegenstände vor der Landung vervollständigen die Korbeinrichtung. Der *Ballast* wird in einfachen Leinwandsäcken mitgeführt, welche mit Bronzehaken an eingeflochtenen Leinenschlaufen am Korbrand aufgehängt werden; soll statt feinem Sand warmes Wasser bei Fahrten für luftelektrische Beobachtungen benutzt werden, so wird dessen Ausfluß durch kleine Hähne oder Metallpfropfen geregelt.

1d) *Fesselballon. Kugelfesselballon.* Im Gegensatz zum Freiballon erhält der Fesselballon durch das Halteseil eine Relativbewegung zur umgebenden Luft, wodurch die Beanspruchung der Hülle sehr vergrößert wird, so daß festere Stoffe nötig sind; dann aber könnte der Wind, indem er sogenannte *Dallen* in die Hülle drückt, auch einen Teil des Gases

herausdrücken, wenn nicht ein Ventilverschluß des Füllansatzes vorgesehen wäre, der erst bei einem bestimmten Ueberdruck abbläst. Ferner muß der Korb von den Bewegungen der Hülle möglichst unabhängig gemacht werden, was zu einer kardanischen Aufhängung desselben führt. Trotzdem ist es wegen der Schwankungen bei einer Windgeschwindigkeit von mehr als 10 m/sec. nicht mehr möglich, einen Kugelfesselballon zum Beobachten zu benutzen.

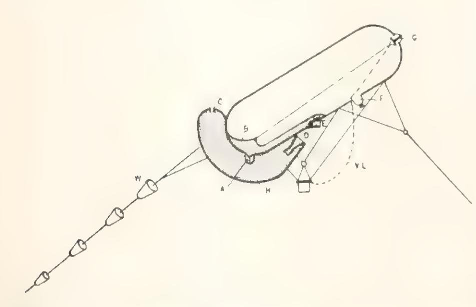


Fig. 2. Fesselballon Parseval-Sigsfeld (Bauart Riedinger). A Luftauslaß zum Steuer, H Steuer, B Ballonet, C Luftaustritt aus dem Steuer, D Windeinlaß in das Steuer, E Windeinlaß in das Ballonet, G Gasventil in Verbindung mit der Ballonethülle, F Füllansatz, V.L = Gasventilleine, W Windfänge.

Drachenfesselballon. Das führte zur Konstruktion des Drachenfesselballones (Parseval-Sigsfeld); durch seine zylindrische Form stellt dieser sich stets in die Windrichtung ein, durch einen Windfang mit Stoffventil bläst der Wind das im unteren Teil der Hülle angeordnete Ballonet auf und erhält so die Form; Windfänge und Segel vermeiden vertikale Bewegungen, letztere erhöhen seinen Auftrieb beträchtlich. Takelung für das Halteseil und Korbaufhängung sind streng getrennt; Auflassen und Einziehen geschieht mittels standfester oder fahrbarer Hand- oder Motorwinden.

1e) Unbemannte Ballone. Sie dienen einmal als Transportmittel für irgendwelche Registrierapparate, können aber auch den Zweck haben, durch die von ihnen eingeschlagene Bahn mit ihren Windungen und Schleifen die Größe und Richtung des herrschenden Windes in den betreffenden Regionen anzugeben. Stets kommt es bei diesen Ballonen auf die Erreichung einer großen Höhe an; da nun mit wachsender Höhe das Raumgewicht der Luft beträchtlich abnimmt, der freie Auftrieb des Füllgases also im gleichen Verhältnis verringert wird, so ist es notwendig, den Ballon ohne Gasverlust steigen zu lassen, was am leichtesten durch eine elastische, geschlossene Hülle erreichbar ist, die aber doch bei der Ausdehnung keine Einbuße an Dichtigkeit erleiden darf. Die Ballone der letzten Kategorie, die ohne Instrumente aufsteigen, werden einfach zugebunden und dann so beschwert, daß sie eine bestimmte Steiggeschwindigkeit aufweisen, die sie dann auch mit großer Annäherung auf ihrem ganzen Wege beibehalten, bis sie an der Grenze ihrer Dehnfähigkeit platzen. Würde man in derselben Weise bei den Registrierballonen vorgehen, so würde voraussichtlich das betreffende Instrument nach dem Platzen des Ballones durch die Erdbeschleunigung so hart aufschlagen, daß es unbrauchbar wird; bei Freifahrten muß daher dieser Fall gemildert werden.

Man wendet daher entweder zwei Ballone an, von denen durch passende Dimensionierung der eine zuerst platzt, worauf die negative Steigkraft des anderen noch genügt, den Fall abzubremsen; hängen dieselben nebeneinander ohne Netz, so haben wir das Hergesellsche Doppelgespann, sind sie dagegen unter einem gemeinsamen Netz untereinander angeordnet, so ist dies die Saulsche Tandemanordnung.

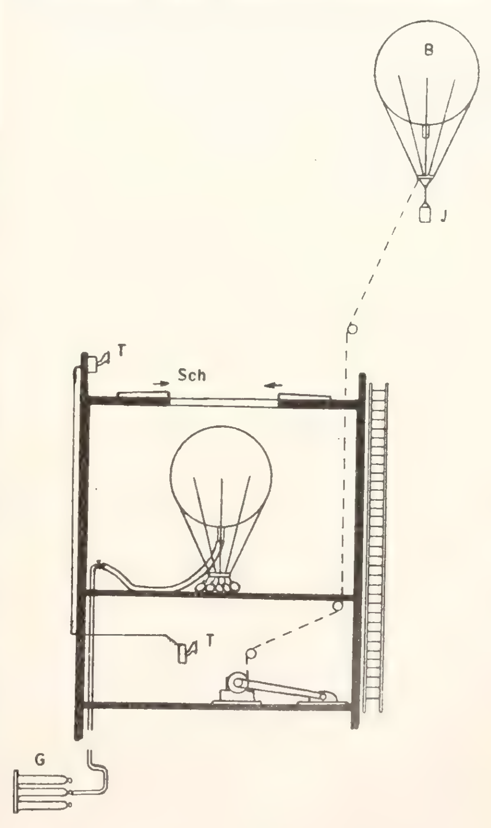


Fig. 3. Aufstiegvorrichtung für Registrierballone. B Ballon, J Registrierinstrument, T Telephon, Sch Schiebedach, G Gasflaschen.

Endlich wird noch die obere Kalotte des Netzes aus Stoff gebildet, der dann nach dem Platzen des Ballones sich fallschirmartig aufbläht und so die nötige Fallverzögerung herbeiführt.

Außerdem verwendet man noch Registrierballone mit Halteseil; handelt es sich nur um zeitlich kurze Aufstiege in größere Höhen, so werden Kugelballone benutzt, die statt des Korbes die Instrumente tragen, sollen dagegen Messungen gemacht werden, die sich über eine längere Zeit erstrecken, so verwendet man zweckmäßig Drachenballone kleineren Maßstabes. Zur Füllung dient fast ausschließlich Wasserstoff, weil dadurch kleine Abmessungen erzielt werden. Die Skizze erläutert die Bedienung eines solchen Ballonaufstieges.

2. Dynamische Luftfahrt. 2a) Leichter als Luft. Bei der dynamischen Luftfahrt wird durch irgendwelche motorische Kräfte stets eine gewisse Bewegung gegen die umgebende Luft erzwungen. Solange nun die Tragkraft nur durch Verringerung des spezifischen Gewichts hervorgerufen wurde, während die motorische Kraft lediglich eine Lenkbarkeit in der Horizontalen erzielte, war das eigentliche Wesen der statischen Luftfahrt durch nichts geändert.

Sehr bald benutzte man aber den Vortrieb dieser Ballone, um ihre Steigkraft zu vergrößern, und erzwang gleichzeitig durch die motorische Kraft Höhenlagen, die dem Verhältnis Steigkraft zu Gewicht nicht entsprachen.

Sollen der Vortrieb und die Lenkbarkeit eines Ballones einen praktischen Wert annehmen, so muß ihm einmal eine genügend große Eigengeschwindigkeit erteilt werden, während ferner die Form des Ballons für die Fortbewegung die günstigste ein muß. Diese Form ergibt sich, wenn der Gesamtwiderstand des Fahrzeugs möglichst klein gehalten wird.

Der Gesamtwiderstand setzt sich zusammen aus dem Form- und Reibungswiderstand, und zwar werden diese beiden rechnerisch auf den Hauptspant und die Gesamtoberfläche des Ballones bezogen, während gleichzeitig die Eigengeschwindigkeit in die Formel eingeht, wobei jedoch beachtenswert ist, daß ersterer etwa mit dem Geschwindigkeitsquadrat, letzterer mit einer kleineren Potenz wächst. Es ergibt sich nun für jedes Ballonvolumen ein bestimmtes Streckungsverhältnis, für das der Gesamtwert und damit auch die erforderliche Motorenleistung am kleinsten wird. Anzustreben ist diejenige Form, die bei geringstem Stirn- und Seitenwiderstand das größte Volumen besitzt und die größte longitudinale Stabilität hat. Jedenfalls sind schroffe Uebergänge in der Linienführung hier wie auch beim Schiffbau zu vermeiden.

Ausführungsarten. Je nach der Ausführungsart unterscheiden wir Gerüst- und Prallluftschiffe. Beansprucht wird die Hülle eines Luftschiffes durch den Winddruck und das Gewicht der angehängten Last; sollen diese Kräfte in kontrollierbarer Weise von der Hülle aufgenommen werden, so muß sie eine hinreichende Starrheit besitzen; entweder stellt man sie daher aus starrem Material her oder man verleiht einer losen Hülle diese Eigenschaft, indem der Gasinhalt mittels des Ballonets unter einem geringen Ueberdruck gehalten wird. Von unserem Gesichtspunkt aus ist es im ersteren Fall gleichgültig, ob die starre Hülle selbst das Gas abschließt oder in ihr noch besondere Tragkörper angebracht sind. Als Kennzeichen ist jedenfalls das starre Gerüst anzusehen, das alle äußeren Beanspruchungen aufnimmt, so daß der Gasinhalt unter keinem nennenswerten Drucke steht; Kennzeichen für die zweite Art ist der Ventilator zur Erzeugung des Ueberdrucks. Einige Schiffe der letzten Art werden häufig mit einem starren Kielträger ausgerüstet bezw. ihre Gondel wird möglichst langgestreckt gebaut, um eine günstigere Verteilung der Last auf die Hülle zu erreichen. Prinzipiell unterscheiden sich diese halbstarren jedoch nicht von den Prallschiffen.

Gerüstschiffe sind aus all diesen Gründen nicht so abhängig von ihrer maschinellen Einrichtung, können leichtere Hüllen verwenden, sind sicherer gegen örtliche Verletzungen, haben größere Längsstabilität und geringere Bauhöhe; dagegen fällt beim Prallschiff das hohe Gerüstgewicht fort, wofür größere Motorkräfte, Geschwindigkeiten und Aktionsradien frei werden, während durch die Möglichkeit, den Ballon zu reißen, leichteres Bergen beim Sturm sowie Transport mit Wagen gewährleistet wird.

Gerüstschiffe der ersten Art, bei denen also die starre Hülle gleichzeitig dem Gasinhalt als Abschluß dient, sind praktisch noch nicht erprobt.

Ein detailliert durchgearbeiteter Entwurf von Rettig sieht ein aus hohlen verleimten Holzstäben zusammengesetztes, unverschiebliches Netzwerk vor, das dann noch mit einer dreifachen Lage verleimter Furniere überdeckt werden soll. Bis zur Oeffnung des Sicherheitsventils könnte dieser Ballon also mit konstantem Gasgewicht und -Volumen fahren.

Ein eigentliches Gerüstschiff mit besonderen Tragkörpern im Innern ist der Zeppelin-Ballon. Das Gerüst besteht aus Längsträgern und Querringen aus Aluminiumprofilen und -rohren; durch die Querringe werden Unterabteilungen gebildet, die jede ihren Tragkörper für sich besitzen; die einzelnen Gashüllen stehen lediglich unter dem Druck eines Ventils, um unnötige Gasverluste zu vermeiden. Durch diese Unterteilung ergibt sich ein großer Schutz gegen irgendwelche Verletzungen, die sich stets auf den

einzelnen Tragkörper beschränken; andererseits können aber auch ungleiche Erwärmungen des Gases vorkommen, die eine ungewollte Schräglage des ganzen Systems herbeiführen. Zwischen der äußeren Hülle dieser Schiffe und den eigentlichen Tragkörpern wird stets ein Luftraum zum Isolieren gebildet, der Temperatureinflüsse von diesen möglichst fernhält, zuweilen auch als Gasbehälter vorgesehen ist, falls ein Gasaustritt aus den Tragkörpern erfolgt.

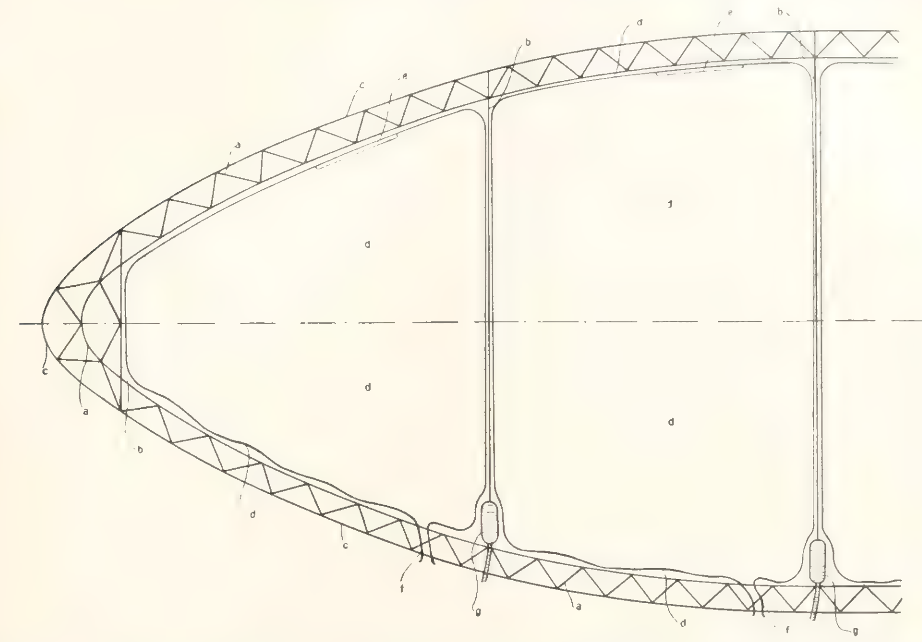


Fig. 4. Zeppelin-Lenkballon, Vorderteil. a Aluminiumgerüst, b Versteifungsringe, c äußere Hülle, d Hülle der Gasbehälter, e Ballonventile, f Füllansätze, g Wasserballastsäcke mit Abflußschläuchen.

Prallschiffe. Bei den Prallschiffen wird die Hülle wie bei Freiballonen aus Ballonstoff gebildet, der lediglich größere Festigkeiten aufweisen muß. Stets muß ein Luftsack (Ballonet) vorhanden sein, der die pralle Form bewahrt, die Größe desselben hängt ab von der gewünschten Leistungsfähigkeit des Schiffes, sowohl in bezug auf den Gasausgleich bei Erreichung großer Höhen als auch für die Diffusion bei langen Fahrten.

Für seine Anordnung sind Stabilitäts- und Gewichtsverhältnisse maßgebend, besonders wenn der Luftsack noch zu Höhensteuerzwecken herangezogen werden soll.

Einzelheiten. Die Steuer- und Vortriebsorgane können natürlich bei den Gerüstschiffen an geeigneten Stellen des Gerüstes angebracht werden, bei Prallschiffen hat man bisher nur die Steuer an der Hülle montiert, die Propeller dagegen an den Gondeln befestigt. Diese Gondeln dienen gleichzeitig als Maschinen- und Aufenthaltsraum für die Leitung des Schiffes; bei Gerüstschiffen schließen sie sich meist der Gerüstform nach unten an, wodurch eine geringe Bauhöhe möglich wird, bei Prallschiffen müssen sie für sich gebaut und durch geeignete Takelage unter der Hülle aufgehängt werden; in diesem Fall wird häufig eine Gitterträgerkonstruktion gewählt. Für die Bemessung des Ventilators ist der gewünschte Druck zusätzlich der Leitungslänge und der Krümmungen sowie

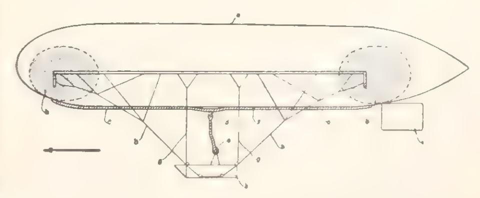


Fig. 5. Parseval-Ballon. a Gasraum, b Ballonet, c Luftleitung, d Umschaltventil, e Ventilator, f Aufhängegurt für die Gondel, g senkrechte Takelung, h Rollenaufhängung, i Seitensteuer hinten, k Gondel.

die Fördermenge maßgebend; für letztere ist wiederum die Geschwindigkeit bestimmend, mit der das Schiff abwärts fahren soll, denn das Luftvolumen V ändert sich bei v m Sinkgeschwindigkeit in der Sekunde um

$\frac{v \cdot V}{8000}$ cbm/sec.: das wäre z. B. bei V = 6000 cbm und v = 2 m/sec. bereits 1,5 cbm/sec.

Bei den Gerüstschiffen ist eine gleichmäßige Verteilung der Last ohne weiteres durch das Gerüst gegeben, bei den Prallschiffen muß diese durch die Takelung oder durch einen langgestreckten Gondelbau oder durch mehrere Gondeln angestrebt werden. Die Aufhängung selbst geschieht durch einen mit der Hülle vernähten und verklebten Gurt, der mit vielen Löchern versehen ist, durch die eine endlose Schnur zur Bildung der einzelnen Schlaufen hindurchgezogen wird. Beim Siemens-Schuckert Schiff, dem größten Prallballon, ist die ganze Takelung dadurch vermieden, daß die Hülle durch Stoffbahnen direkt mit den Gondeln verbunden wird und so gleichzeitig als Kiel wirkt.

Höhensteuer-Einrichtungen. Jedes Luftschiff kann wie ein Freiballon eine Veränderung seiner Höhenlage durch Ballastgabe und Ventilzug herbeiführen; es ist also auch wie dieser vollständig unstabil. Diese für den Freiballon selbstverständlichen Funktionen dürfen jedoch beim Luftschiff nur im Notfall Anwendung finden, da durch sie eine Verkürzung der Fahrtdauer verursacht wird. Weit rationeller ist es, die Eigengeschwindigkeit gegen die umgebende Luft zur Erzeugung von Kräften zu benutzen, welche das Schiff über oder unter seine Gleichgewichtslage bringen und hier eventuell dauernd halten. Diese Kraft wird im allgemeinen durch Neigung der Schiffsachse gegen die Horizontale erreicht, so daß der Luftstrom eine senkrechte Komponente erzeugt, die der Steig- oder Sinkkraft gleich, aber entgegengesetzt gerichtet ist und so einen neuen Gleichgewichtszustand für das Schiff herbeiführt. Da es sich stets um kleine Winkel (6 bis 9°) handelt, kommt der Verlust an Eigengeschwindigkeit hierdurch kaum in Frage.

Die Schiefstellung des Schiffes wird einmal erzwungen, indem durch ein Laufgewicht der Systemschwerpunkt verschoben wird oder aber indem bei Anordnung von zwei Luftsäcken der Gasinhalt in der Hülle verlagert und dadurch der Deplacementsschwerpunkt verschoben wird, schließlich durch verdrehbare Steuerflächen.

Die erste Anordnung mit Laufgewicht wurde bei den ersten Zeppelinschiffen angewendet, eine besondere Modifikation ist noch jetzt gebräuchlich, indem je ein Wasserbehälter vorn und hinten am Schiff zwangläufig gefüllt und geleert wird (Erbslöhschiff); die Verschiebung des Deplacementsschwerpunkts wird beim Parsevalschiff durch Benutzung der beiden Ballonets vorn und hinten angewendet.

Diese Methoden haben den Vorzug, bei ruhendem Schiff eine Schräglage herstellen zu können, was z. B. bei der Abfahrt von Nutzen ist; diesem Vorteil steht die langsamere Wirkung gegenüber, daher werden in neuerer Zeit besondere Flächensteuer zur Erzielung einer Schiefstellung des Schiffes benutzt.

Um eine gleiche Wirkung beim Aufwärts- und Abwärtssteigen zu erzielen, muß das Flächensteuer möglichst in der Ballonachse angeordnet werden; das vorn liegende Bugsteuer ist dem Hecksteuer vorzuziehen, weil ihm stets der Neigungswinkel der Ballonachse als Gewinn zugute kommt und weil ferner die durch das Höhensteuer ausgelöste Kraft des Luftwiderstandes in der gewünschten Richtung auf den Schwerpunkt des Schiffes mit einwirkt. Bei einem Gerüstschiff kann das Höhensteuer auch geteilt werden, wodurch sich außer den erwähnten Schräglagen noch eine besondere Art der Höhensteuerung ergibt. Gibt man nämlich beiden Steuern die gleiche Neigung, so läßt sich das Schiff in horizontaler Lage erheblich über oder unter seine Gleichgewichtshöhe bringen und erhalten.

Den Höhensteuern fällt neben der Steuerung bei den Luftschiffen die Aufgabe zu, alle Störungen der Gleichgewichtslage durch atmosphärische Einflüsse oder durch den Verbrauch an Betriebsmitteln so auszugleichen, daß immer ein Fahren in der gewünschten Höhe erfolgen kann. Das Luftschiff ist also noch so lange fahrfähig, als diese Ausgleichmöglichkeit besteht; ist das Steuer aber einmal voll belastet, so bedeutet jedes weitere Fahren durch seine Erleichterung infolge Verbrauchs von Betriebsmitteln den Uebergang des Schiffes zum einfachen Freiballon und ein wirklich noch vorhandener Vorrat von Benzin usw. ist in erster Linie als verfügbarer Ballast zu betrachten. Die richtige Bemessung des Höhensteuers ist also auf den Aktionsradius eines Luftschiffes von erheblichem Einfluß.

Sämtliche bisher genannten Steuervorrichtungen hängen vom Quadrat der Eigengeschwindigkeit ab, so daß Betriebsstörungen des Motors hier unangenehm zum Ausdruck gelangen, bei verminderter Geschwindigkeit kann nur Ventilzug oder Ballastabgabe die Höhenlage ändern, wenn nicht die Möglichkeit von besonders angetriebenen Hubschrauben noch erwähnt werden soll.

2b) Schwerer als Luft. Die Luft setzt wie jede andere Flüssigkeit der Bewegung eines Körpers einen gewissen Widerstand entgegen, der von der Dichte abhängig ist, und welcher als Stützpunkt für den Vor- und Auftrieb benutzt werden kann. Da die Luftdichte auch von der Kompressibilität der Luft abhängt, so sei hier gleich vorausgeschickt, daß bei den in der Flugtechnik üblichen Geschwindigkeiten eine durch diese hervorgerufene Aenderung der Luftdichte vernachlässigt werden kann.

α) Flug von Organismen. Pflanzenflug. In der Natur sind diese Eigenschaften der Luft einmal dazu

benutzt worden, die Ausbreitung der Flora durch passende Formgebung der betreffenden Samen zu unterstützen. Dies wird z. B. dadurch erreicht, daß der betreffende Fortpflanzungskörper denkbar klein gehalten wird, wobei er doch eine verhältnismäßig große Oberfläche bekommt, so daß eine große Luftreibung und dadurch große Fallverzögerung entsteht. Diesen kleinen Lebewesen gelingt es ohne irgendwelche andere Ausrüstung, sich mit dem geringsten Luftzug über große Horizontalentfernungen fortzubewegen.

Obgleich die Form hierfür nicht eigentlich entscheidend ist, handelt es sich doch meist um Gebilde von kugelförmiger Gestalt.

Für die Verbreitungsorgane der höheren Pflanzen mit ihren größeren Gewichten reichte die vorige Lösung nicht mehr aus, sollte trotzdem der Wind als Transportmittel herangezogen werden, so mußte das Prinzip der Oberflächenvergrößerung weiter ausgebaut werden. Dem eigentlichen Samen wurden also besondere Flugorgane angefügt, die bei geringem Gewicht eine große Oberfläche besaßen; so finden wir z. B. beim Samen vom Bocksbart einen nach oben offenen Trichter aus steifen Haaren, der noch durch eine Verflechtung von feinen Haaren gedichtet wird. Beim Fallen wird hierdurch eine große Luftreibung erzeugt, die wiederum eine genügend große Fallverzögerung nach sich zieht.

Eigentlich flugtechnische Gebilde finden wir jedoch erst bei den Samen mit Flügelansätzen, von denen als schönste Arten die auf Java heimischen Zanonia macrocarpa und Bignonia mucronata zu nennen sind.

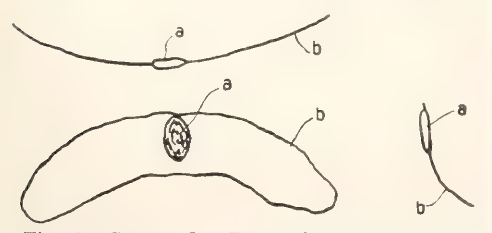


Fig. 6. Samen der Zanonia macrocarpa. a eigentlicher Samen, b Flügelflächen.

Wie aus der Figur ersichtlich, ist die breitere etwas verstärkte Vorderkante der schwach nach unten gewölbten Fläche beim Fluge nach vorn gerichtet; nahe dieser Vorderkante liegt vertieft der eigentliche Same, der zugleich der schwerste Teil des ganzen Gebildes ist, so daß sich von Anfang an ein unterlastiges Fliegen ergibt. Durch das Nachvornlegen des Schwerpunktes stellt sich die Zanonia schnell in die zum Gleiten richtige, etwas nach vorn geneigte Lage ein; die nach hinten nachgiebig und elastisch auslaufenden Tragflächen wirken sofort wie ein Höhensteuer indem sie bei schrägerer Lage als zum rechten Gleiten nötig, sofort erhöhten Luftdruck erhalten und dadurch sogleich den Apparat wieder in die richtige Lage bringen.

Tierflug im allgemeinen. Konnte die Natur in der Planzenwelt nur durch geeignete Formgebung ein weites Verbreiten der Fortpflanzungsorgane erleichtern, während sie alles andere dem Transportmittel — dem Wind — überlassen mußte, so gelang es dagegen einer jahrtausendlangen Entwickelung, Flugtiere zu schaffen, denen trotz ihrer manchmal erheblichen Gewichte die Luft doch eine ebenso genügend sichere Unterlage zur Fortbewegung liefert, wie z. B. den Fischen das Wasser und deren über den ganzen Körper verteilten Nervenstränge sie befähigen, den kleinsten Windschwankungen durch Reflexbewegungen augenblicklich zu begegnen.

Naturgemäß hat man sich schon in den frühesten Zeiten mit dem Studium des Tierfluges befaßt — die älteste Schrift hierüber rührt von Leonardo da Vinci 1514 her — aber erst die chronographischen Methoden (Marey 1884) brachten einige Klarheit in die Anschauungen, wenn auch über verschiedene Arten des Tierfluges noch heute mehrere Hypothesen nebeneinander bestehen.

Vogelflug. Aus einer genauen Beobachtung des Tierfluges haben sich dann vor allen Dingen die fünf Arten: Ruderflug, Gleitflug, Schweben, Segeln und Kreisen ergeben. Beim Ruderflug findet ein periodisches Heben und Senken der Flügel statt und je nach dem Ausschlag sowie der Periodizität erfolgt das Erheben des Tieres in mehr oder weniger steiler Bahn; da bei dieser Flugart am offensichtlichsten die Schwerkraft zu überwinden ist, wirkt sie derart ermüdend, daß einige Vögel überhaupt nicht imstande sind, sich auf kleinem Raum, d. h. steil zu erheben. Der Ruderflug muß daher zeitweilig unterbrochen werden und es wird nun die einmal erreichte Höhe benutzt, um in den Gleitflug überzugehen, bei welchem der herabsinkende Körper durch Schrägstellung der unbeweglich gehaltenen, aber vorgedrückten Flügel ähnlich dem vorerwähnten Samen eine horizontale Kraftkomponente erhält. Diese treibt ihn nun mit einer Geschwindigkeit vorwärts, die lediglich durch den Luftwiderstand des Körpers vermindert wird, so daß eventuell unter Verbrauch der erworbenen lebendigen Kraft der Bewegung eine erneute Hebung eingeleitet werden kann. Die dritte Art — das Schweben — setzt stets das Vorhandensein aufsteigender Luftströme voraus, die sich auf Waldlisieren und an schroffen Felsküsten bilden. Die Muskelkraft des Vogels wird dann nur dazu benutzt, schwache Drehbewegungen der Flügel um ihre Längsachse auszuführen und so das Gleichgewicht zu

erhalten. Am schwierigsten, aber auch für die Flugtechnik entschieden am nutzbringendsten ist die nächste Flugart — das Segeln.

Wird beim Ruderflug die Muskelkraft, beim Gleitflug die Schwerkraft als Arbeitsleistung herangezogen, so dient beim Segeln die lebendige Kraft des Windes als Energiequelle, und zwar unterschiedlich vom Schweben derart, daß der Körper nicht nur in gleicher Höhe gehalten, sondern ihm auch ein Vortrieb verliehen wird.

Der Segelflug in gerader Richtung ist nur denkbar, wenn z. B. der von den Segeln eines großen Schiffes zurückprallende Wind eine solche Richtung hat, daß er gleichzeitig tragend und treibend auf den Vogel wirkt, ähnlich würde der von der großen Bug- oder Heckwelle abprallende Wind eines Dampfers wirken können. Aber auch ohne diese Einschaltung ist eine direkte Ausnutzung der Energie des Windes denkbar, wenn bei einem Bogenflug die durch das Eigengewicht geschaffene Zentrifugalkraft gerade den Rücktrieb des Windes ausgleichen würde, so daß bei Vollendung eines Kreises nur eine zweimalige Lagenänderung der Längsachse zu erfolgen hätte.

Am wenigsten ist bisher das Kreisen geklärt; ob nur die Pulsationen der Luft oder die aufsteigenden Luftströme oder die mit steigender Höhe wachsende Windgeschwindigkeit oder sämtliche drei Möglichkeiten zusammen das Kreisen vermitteln, das muß späteren genauen Forschungen überlassen bleiben.

Die einzige rein aktive nur durch die Muskel erzeugte Flugart ist der Ruderflug, während bei sämtlichen übrigen Arten mehr oder weniger andere Kräfte geschickt ausgenutzt werden. Bei den Vögeln nimmt die Menge der Muskeln ungefähr denselben Bruchteil wie bei den übrigen Tieren ein; auch die Leistungsfähigkeit der Muskeln ist von denen anderer Tiere nicht verschieden; bei der Erhebung vom Boden haben größere Tiere eine verhältnismäßig größere Arbeit zu leisten als kleine, dagegen bieten sie beim Flug einen verhältnismäßig kleineren Stirnwiderstand; daher sind auch die beim Fluge erreichbaren Dauer-Geschwindigkeiten bei allen Tieren in allgemeinen dieselben.

Insektenflug. Bringt man die Horizontalprojektionen verschiedener Flugtiere auf denselben Maßstab, so lassen sich deutlich die Unterschiede zwischen Vogel- und Insektenflügel erkennen. Finden wir beim ersteren stets die schmale, langgestreckte Form mit nach den Enden abnehmender Breite, so zeigt der Insektenflügel meist erst in einiger Entfernung vom Körper, ja manchmal sogar erst am Ende die größte Breite. Das rührt daher, daß die Insekten weit weniger als die Vögel die äußeren Wind- und Erdkräfte in Anspruch nehmen, daß es also bei ihnen auch weniger auf große Tragflächen ankommt. Der Insektenflug wird mit wenigen Ausnahmen nur durch Flügelbewegung erreicht; durch die vorn steife, hinten nachgiebige Bauart neigt sich der Flügel beim Niedergang etwas nach vorn, beim Aufgang etwas nach hinten (achtförmige Bahn), so daß stets eine vortreibende Kraftkomponente resultiert.

Daß diese Deformation sich nur durch den Luftwiderstand ergibt, nicht aber durch besondere Muskeln des Insekts, ist durch Bull nachgewiesen, dessen Aufnahmen im luftleeren Raum keinerlei Veränderung des Flügels feststellen konnten.

Bei den mit zwei Flügelpaaren versehenen Insekten benutzen einige die Vorderflügel lediglich als unbewegliche Tragflächen, um während des Rückganges der Hinterflügel zu gleiten, während ihnen andere eine, wenn auch langsamere Bewegung erteilen, die in dem Moment beginnt, wenn die Hinterflügel zur Rückwendung ansetzen.

β) Kunstflug. Die Technik konnte von Anfang an nicht das als so zweckmäßig anerkannte Prinzip möglichster Kleinheit für den Apparatebau weiter verfolgen, weil sie, dem Eigengewicht des Menschen Rechnung tragend, ohne weiteres auf große Abmessungen kam.

Drache. Ein schon viele Jahrhunderte bekannter Flugapparat — der Drache — der auch schon von Benjamin Franklin 1742 zu wissenschaftlichen Experimenten benutzt wurde, gelangte doch erst unter Hargrave und Baden-Powell bei flugtechnischen Versuchen zur Verwendung.

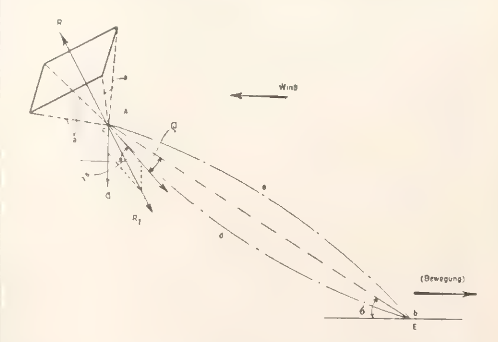


Fig. 7. Schema des Drachen. A Befestigungspunkt der Last Q, E Haltepunkt am Erdboden, a Schnüre zur Einstellung des richtigen Winkels (der Bucht), Wkl. $\sigma \sim$ Wkl. ϱ, daraus zu berechnen, bdc Krümmung der Leine, bec Weg des Drachens beim Aufstieg.

Unter einem Drachen verstehen wir einen Körper mit größerem spezifischem Gewicht als Luft, der durch eine Verbindungsschnur mit dem Erdboden in eine solche Stellung gebracht wird, daß die senkrechte Komponente des Windes ihn in der Luft schwebend erhält. Dabei ist es im Prinzip gleichgültig, ob der natürliche Wind hierzu bei ruhendem Haltepunkt ausreicht, oder ob letzterer zur

Erhöhung des Winddruckes eine Eigenbewegung erhält. Ein Drache besteht aus einer beliebig begrenzten, ebenen Platte, deren Eck- oder sonstige Punkte durch Schnüre mit einem Halteseil im Punkt A verbunden sind, an dem auch die Last Q angreift. Gleichgewicht herrscht, wenn die Resultierende aus Seilspannung und Gewicht R gleich der Resultierenden des Winddrucks ist.

Reicht der natürliche Wind nicht aus, eine genügend große Resultierende hervorzubringen, so muß Punkt E in der entgegengesetzten Richtung fortbewegt werden, um die richtige Schwebegeschwindigkeit zu erzeugen. Diese Schwebegeschwindigkeit hängt aber auch von dem Angriffswinkel ab, den die Ebene mit dem Luftstrom bildet, und läßt sich durch passende Längenbemessung der Schnüre (a) so einstellen, daß die größtmöglichste Horizontalgeschwindigkeit bei kleinster Leistung, also auch bei kleinstem Zug in der Schnur entsteht.

Drachen werden benutzt, um eine Vorwärtsbewegung 1. in horizontaler, 2. in vertikaler Richtung zu erzielen. Zu 1 ist eine gewisse seitliche Lenkbarkeit durch Steuer oder aber durch zwei Seitenleinen nach Art eines Zügels anzustreben (bis 15° gegen die Windrichtung sind möglich), die Höhenlage wird dann durch das Gewicht der Trosse annähernd konstant gehalten. Anwendung, um vom gestrandeten Schiff aus eine Verbindungsleine ans Land zu befördern.

Bei 2 muß der horizontale Weg des Drachen tunlichst klein gehalten werden.

In diesem Fall sollen entweder leichte Registrierapparate in große Höhen oder große Lasten (Menschen) auf geringe Höhen gebracht werden; endlich dient der Drache noch zur Höhenmessung von Wolken, sowie als Endpunkt der Antenne bei Feldstationen für drahtlose Telegraphie.

Für die Verwendbarkeit des Drachen ist seine Hubkraft und Stabilität maßgebend; er muß schon bei schwachem Wind steigen, bei stärkerem Wind steil stehen und muß ferner relativ zu seinen Abmessungen kräftig ziehen; dann wird ruhiges Fliegen verlangt, während ein Zurseiteschießen oder Abwärtstauchen möglichst zu verhindern ist. Wegen ihres Gewichtes und des auf ihr lastenden Winddrucks nimmt die Leine eine nach unten und lee konvexe Krümmung an, und zwar bewirkt der Winddruck eine solche Aenderung der sonst auftretenden Kettenlinie, daß in der Praxis σ sehr angenähert $= \varrho$ wird, woraus sich ein einfaches Mittel ergibt, den für den Aufstieg wichtigen Winkel ϑ der zwischen 50° und 70° betragen muß, zu messen. Die Krümmung der Leine allein setzt den Drachenaufstiegen eine Höhengrenze, die sich nur durch Anheften weiterer Drachen an den oberen Teil der Leine umgehen läßt.

Für große Längen kommt als Leinenmaterial nur noch Stahldraht (bis höchstens 1,5 mm Durchmesser) in Betracht; die Drachen werden in der üblichen Weise aus Stoff hergestellt, der über ein passendes Holzgerüst gespannt wird. Ständige Drachenstationen verwenden zum Auflassen und Einholen besondere Haspel, die manchmal in drehbaren Hütten untergebracht sind.

Kommt das Emporheben größerer Lasten in Frage (militärische Beobachtungsposten), so werden mehrere Drachen zu Drachen-Gespannen zusammengesetzt und zwar wird die Einrichtung vielfach so getroffen, daß ein großer Drachen-Zug das Hauptseil gespannt erhält, auf dem an einem beweglichen Wagen die eigentliche Gondel entlang gleiten kann; diese Gleitbewegung wird nun durch einen zweiten Drachen-Zug bewerkstelligt, so daß ein Auf- und Absteigen erfolgt, ohne daß der Hauptzug heruntergeholt zu werden braucht.

Fallschirme können nicht in der Luft schweben, sondern vermögen nur für sich und ihre Last eine Fallverzögerung hervorzubringen, jedoch besteht keinerlei Verbindung zwischen ihnen und dem Erdboden.

Fallschirme finden in neuerer Zeit wissenschaftlich dadurch Verwendung, daß man sie den Registrierballonen anfügt, um beim Platzen derselben einen sanften Fall der Instrumente herbeizuführen; sonst kommen sie lediglich für artistische Zwecke bei bemannten Ballonaufstiegen in Betracht.

Um ein senkrechtes Fallen zu erzielen, ist es notwendig, daß der Schwerpunkt senkrecht unter dem Luftangriffspunkt, d. h. bei gleichmäßig entwickeltem Areal lotrecht unter der Mitte liegt; je größer der Abstand desselben von der Fläche ist, desto größer wird auch das stabilisierend wirkende Drehmoment (allerdings auch die Schwankung), im Fall ein seitlicher Windstoß das ganze System geneigt hat. Nach kurzer Beschleunigungszeit nähert sich das Fallen einer konstanten Geschwindigkeit, die nur von der Flächenbelastung abhängt und etwa folgende Werte annimmt

Belastung: kg/m²:	1	2	4	8	16
Fallgeschw. m/sec:	2,4	3,5	5,0	6,0	10

Die Tragkraft verschiedener Systeme ergibt sich nach folgender Zusammenstellung (siehe Fig. 8).

Die trichterförmige Ausführung bietet bei den gefürchteten Schwankungen ein ausgleichendes Mittel; der mehr horizontal liegende Teil der Fallschirmfläche hat im Gegensatz zum anderen Teil derselben einen weit größeren Auftrieb, der stets ein wiederaufrichtendes Moment erzeugt.

Eine Fallverzögerung ist auch dadurch zu erreichen, daß der Rotationsfall einer dünnen Platte nachgeahmt und eventuell künstlich unterhalten wird. Nach einem Vorschlag von Köppen soll der betreffende Gegenstand (Mensch oder Apparat) in der Plattenebene derart untergebracht

werden, daß diese selbst eine Rotation ihrer Querachse um ihn herum ausführen kann und zwar beginnt ein gleichmäßiges Rotieren um die sich horizontal einstellende, längere Achse mit gleichzeitigem Fortschreiten nach der in der Rotation aufsteigenden Kante, wodurch ein wesentlich langsamerer Fall mit Vermeidung der Schwankungen erreicht wird. Falls es sich um einen bemannten Apparat handelt, wäre noch die Möglichkeit einer Verschiebung des Aufhängepunktes von der Mitte nach der vorderen Kante zu in Erwägung zu ziehen, um so nach Wunsch in den Gleitfall überzugehen.

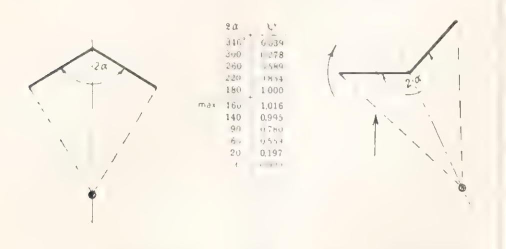


Fig. 8. Fallschirm. Ist 2α der Spreizwinkel, so ist die Tragkraft $k = \psi . k_0$, wenn k_0 = Tragkraft der gleich großen ebenen Fläche ist.

G l e i t f l u g i m a l l g e m e i n e n. Für alle Bewegungsvorgänge irgendwelcher Körper in Flüssigkeiten ist es für diese Vorgänge selbst ganz gleichgültig, ob sich die Körper in der Flüssigkeit bewegen oder ob die Flüssigkeit sich um die Körper bewegt, da es stets nur auf die relative Verschiebung gegeneinander ankommt.

Dieses Relativitätsgesetz erfordert nur dann gewisse Einschränkungen, wenn die Bewegung in der Nähe eines nicht an den Vorgängen teilnehmenden größeren Körpers stattfindet, der durch Reibung oder Stau oder dgl. die Bewegung in irgendeiner Weise verändert. So kann insbesondere die Bodennähe von wechselndem Einfluß sein, wenn das Flugzeug bei gleichbleibender Windstärke und Richtung einmal mit dem Wind oder gegen ihn in verhältnismäßig geringer Entfernung vom Erdboden fliegt.

Die lotrechte Sinkgeschwindigkeit einer horizontal gestellten, freischwebenden, ebenen Platte wird erfahrungsgemäß kleiner, wenn der Platte gleichzeitig eine Verschiebung in ihrer Ebene zuteil wird, und zwar erhält die Fallstrecke einen um so kleineren Wert, je größer die seitliche Verschiebung der Platte in der Zeiteinheit wird. Die Bewegung geschieht, weil der Schwerpunkt gleichzeitig beiden Bewegungen folgen will, in Richtung der Diagonale des aus beiden Geschwindigkeiten gebildeten Parallelogramms; die Geschwindigkeit der resultierenden schrägen Bewegung muß daher größer sein als beim freien Fall. Die Ebene der schräg sinkenden Platte bildet mit der Bewegungsrichtung, d. h. mit der Richtung der resultierenden Geschwindigkeit einen spitzen Winkel ε. Die Mittelkraft des Luftwiderstandes ist wegen der horizontalen Lage der Platte senkrecht nach oben gerichtet, sie wirkt also als direkter Auftrieb und vermindert das Gewicht der Platte.

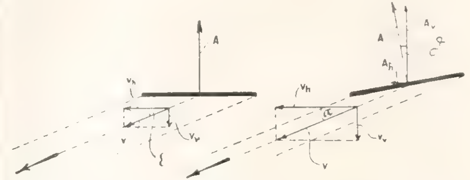


Fig. 9. Gleitende Platte. Die Pfeile bedeuten die Gleitrichtung.

Die schräg gleitende Platte vermag demnach bei gleicher Fallhöhe ein größeres Gewicht zu tragen oder sie sinkt bei gleichem Gewicht langsamer als die frei fallende Platte, was vor allen Dingen durch die Vergrößerung der Stützmasse zu erklären ist. Liegt nun die Platte nicht wagerecht, so schließt die Mittelkraft des durch den Luftwiderstand hervorgerufenen Auftriebs einen Winkel δ mit der durch den Druckmittelpunkt gezogenen Senkrechten ein, so daß eine Zerlegung des Auftriebs in eine senkrechte A_v und horizontale A_h Komponente notwendig wird. Hiervon wirkt die Vertikalkraft dem Gewicht entgegen, die wagerechte dagegen als Vortrieb. Wird die Platte in der angegebenen Weise aus einer erhöhten Lage fallen gelassen, so wird sich nach kurzer Beschleunigungsperiode, während welcher die Vertikalgeschwindigkeit überwiegt, die gleichmäßige, resultierende Geschwindigkeit einstellen; die Platte gleitet in schräger Bahn abwärts. Nimmt nun aus irgendeiner Ursache die Geschwindigkeit zu, so wächst A und seine Komponenten (ungefähr mit dem Geschwindigkeitsquadrat), natürlich nehmen auch die passiven (Stirn-) Widerstände im gleichen Verhältnis zu, so daß diese sich wieder das Gleichgewicht halten; A_v ist aber gewachsen, ohne daß natürlich das Apparatgewicht zugenommen hätte, so daß hier ein Kraftüberschuß entsteht, der bestrebt ist, die Bahn zu heben, d. h. die Neigung zwischen Platte und Gleitbahn zu verringern. Dies ergibt wieder eine Abnahme der Widerstände, woraus eine weitere Geschwindigkeitssteigerung folgt.

Theoretisch wäre eine solche Steigerung solange möglich, bis die Plattenebene mit der Flugbahn des Schwerpunktes zusammenfiele; im allgemeinen ist jedoch ein kleiner Winkel zwischen beiden vorhanden.

Nun kann aber auch aus irgendeinem Grund eine zu große Neigung der Platte

gegen die Flugbahn eintreten, die Platte erhält Abtrieb, d. h. der Vortrieb wird kleiner und das Gewicht wird durch den negativen Auftrieb vergrößert, wodurch ein jäher Absturz unvermeidlich wird.

Um diese ungewollte Neigung des Apparates zu verhindern, könnte entweder der Schwerpunkt schnell weiter zurück verlegt werden, oder aber es müßte außerhalb der Fläche eine Kraft ausgelöst werden, die eine Rückdrehung in die ursprüngliche Lage vollzieht.

Die erste Methode wandten Lilienthal und seine Schüler bei ihren Gleitflügen an, indem sie durch Veränderung ihrer Körperlage (Bewegungen der Beine) den Schwerpunkt verlegten; bedeutend häufiger ist jedoch die zweite Methode, die derart ausgebaut ist, daß eine willkürlich drehbare Fläche, deren Lagerpunkt fest mit der Haupttragfläche verbunden ist, direkt den Luftstrom für die Erzeugung einer Gegenkraft nutzbar macht.

Wird diese Fläche, das Höhensteuer CD, gegebenenfalls scharf nach oben gelegt, so entsteht eine Reaktion, welche die Tragfläche so dreht, daß der Windangriff wieder von unten erfolgt.

Mit diesem vorn liegenden Höhensteuer ist äußerst vorsichtig umzugehen, da durch den Winddruck die gewollte Wirkung stets noch verstärkt wird, so daß sehr leicht ein Aufbäumen des Flugzeugs erfolgt.

Um nun auch Drehungen, die durch irgendwelche Windstöße leicht dem Apparat erteilt werden, ausgleichen zu können, bedarf man eines zweiten Steuerorgans, des Seitensteuers. Wie aus der Figur 10 ersichtlich ist, wird durch den relativen Wind eine Reaktion erzeugt, die bestrebt ist, das ganze Flugzeug solange zu drehen, bis die Steuerfläche wieder in Richtung des Luftstromes liegt; dadurch wird aber die mit A schräg vorrückende Tragfläche eben bei A einen erhöhten Druck erfahren und hierdurch bei A gehoben werden. Ist diese seitliche Hebung bereits eingetreten, so bewirken sowohl das Gewicht als auch die Luftreaktion ein gleichzeitiges seitliches Abrutschen neben dem Vorwärtsgleiten, das solange anhält, bis wieder die Flugrichtung mit den Außenrändern der Fläche parallel ist. Unterstützt wird dieser Vorgang noch durch die Einwirkung des Kieles, einer senkrecht auf der Fläche parallel zur Bewegungsrichtung stehenden Fläche, die stets das Bestreben hat, sich in die Flugrichtung einzustellen und so eine Rückkehr bei erzwungenem Ausschlag erleichtert.

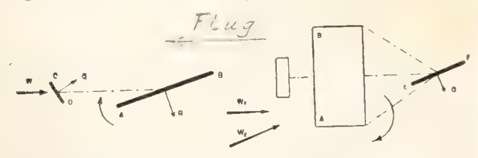


Fig. 10. Erklärung der Flächensteuer. AB Tragfläche, CD Höhensteuer, EF Seitensteuer, Q Steuerkraft, W relativer Luftstrom beim Fliegen, W_1 bei Beginn der Seitensteuerwirkung, W_2 am Ende derselben.

Gleitflugapparate. Die ersten grundlegenden Versuche über den Gleitflug größerer Lasten sind durch Otto Lilienthal gemacht worden und erstreckten sich vornehmlich auf das Studium der Auftriebs- und Widerstandsunterschiede gleichgroßer ebener und gewölbter Platten, wobei er zuerst auf die erheblichen Vorteile der Wölbung hinwies.

Seine auf Grund dieser Studien gebauten Flugzeuge bestanden in der Hauptsache aus 2 Tragflügeln (8 bis 10 qm Tragfläche), die aus einem mit Schirting bespannten Gestell aus Weidenruten hergestellt waren (Breite 2 m, Spannweite etwa 7 bis 8 m), und trugen möglichst weit zurückliegend eine feste senkrechte Stabilisierungsfläche. Diese Flügel wurden entweder mit den Händen gefaßt oder man hing sich mit den Achseln über gepolsterte Bügel; in jedem Fall blieben die Beine für das Anlaufen, Lenken und Landen frei; und zwar mußte beim Anlaufen gegen den Wind erst die kritische Geschwindigkeit erreicht werden, die zum Tragen des Gewichts nötig war. Das Lenken sowie das Ausgleichen irgendwelcher Seitenwindstörungen wurde durch schnelle Beinbewegung erzielt. Auch sein Schüler Chanute änderte an dieser innigen Verbindung zwischen Mensch und Tragflügel noch nichts; er löste lediglich die Einzelfläche in ein System von übereinanderliegenden Flächen auf. Erst die Gebrüder Wright führten mit großem konstruktiven Geschick eine vollständige Trennung der Funktionen des Flugapparates von den Körperbewegungen des Fliegers durch. Bei ihrem Zweidecker ohne Vertikalfläche liegt der Flieger horizontal auf der unteren Fläche; zum Lenken wird ein vorderes Höhensteuer und ein hinteres Seitensteuer benutzt. Für die Entwickelung noch interessant ist das Gleitflugzeug von Wels, das seine äußere Gestaltung dem Samen der Zanonia verdankt; jedoch wurde auch hier noch jede Lenkung durch Körperbewegungen des aufrecht in Fechterstellung auf der Fläche stehenden Fliegers eingeleitet.

Berechnungsgang. Um einen kurzen Ueberblick über die Berechnung zu geben, denken wir uns wieder die vorerwähnte Platte als Bestandteil dieser Flugapparate; es kommt ihr also als Tragfläche die Aufgabe zu, eine möglichst große Fallverzögerung bei gleichzeitig geringster Bremsung der Horizontalbewegung hervorzubringen. Zweckmäßigerweise muß daher auch der Luftwiderstand in den ~~gegen die Tragkraft~~ wirkenden (also hemmenden) Widerstand W und den auf die Tragfläche

einwirkenden (also tragenden) A getrennt werden. Die Größe dieses Luftwiderstandes hängt einmal von der Relativgeschwindigkeit, dann von den Plattenabmessungen und ihrer Gestaltung und endlich von dem Winkel ab, unter dem die Hauptrichtung des Umströmens stattfindet; der hemmende Widerstand setzt sich wieder aus der Oberflächenreibung und dem Stirnwiderstand zusammen, die beide tunlichst klein zu halten sind. Eine passende Zerlegung in horizontale und vertikale Komponenten ergibt wieder für den Vortrieb hemmende und treibende Kräfte, die ihrerseits wieder bedingen, daß der Flugapparat zuerst die veränderliche Beschleunigung g' annimmt, deren beiden Komponenten sind:

$$g'_h = \frac{A_h - W_h}{G} \cdot g \text{ und } g'_v = g \cdot \frac{G - (A_v + W_v)}{G}$$

für $A_h = W_h$ und $A_v + W_v = G$ wird g'_h und $g'_v = 0$, es tritt somit der Beharrungszustand ein und das Gleitflugzeug bewegt sich von da an mit gleichbleibender Geschwindigkeit v', die ihrerseits wieder die beiden Horizontal- und Vertikalkomponenten hat: v'_h und v'_v. Hieraus folgt dann der unveränderliche Gleitwinkel $\underline{\delta}$ des freien Gleitfalles im Beharrungszustand: $\operatorname{tg} \delta = \frac{v'_v}{v'_h}$

Beim freien Fall im luftleeren Raum wandelt sich die verschwindende Energie der Lage vollständig in Bewegungsenergie um. Da die Fallgeschwindigkeit beim Fall durch die Luft im Beharrungszustand unverändert bleibt, findet auch keine Aenderung der Bewegungsenergie des Fallkörpers statt. Der Unterschied der eben erwähnten Platten und der bei Flugapparaten verwendeten flügelartigen Gebilde besteht darin, daß die Wandstärken bei diesen so beträchtlich werden, daß sie nicht mehr vernachlässigt werden können. Dem ohne Berücksichtigung der Oberflächenreibung parallel zur Stromrichtung wirkenden Luftwiderstand, der in der Hauptsache tragend wirkt, stellt sich als hemmend die ebenfalls in Richtung des Stromes wirkende Komponente der Oberflächenreibung sowie der Körperwiderstand entgegen. Dieser letzte wird meist dem Geschwindigkeitsquadrat direkt proportional gesetzt, was vielleicht etwas zu groß ist, jedenfalls aber nicht sehr von der Wirklichkeit abweicht. Mit großer Annäherung kann innerhalb praktisch vorkommender Werte des Richtwinkels ε die Oberflächenreibung und der Stirnwinkel als unabhängig von ε angenommen werden, so daß sie generell zusammenzufassen sind.

Motorflug im allgemeinen. Soll nun der Winkel des ~~freien Gleitfalles~~ im Beharrungszustand kleiner werden als beim ~~Gleitflug~~, so muß zu den bereits vorhandenen Kräften noch eine weitere Kraft hinzukommen, die wieder eine Vortriebskomponente und einen freien Auftrieb erzeugt. Diese Kraft kann in irgendeiner Form auf dem Apparat selbst ausgeübt werden, bedingt aber stets einen fortgesetzten Aufwand an Arbeit. Unter diesen Bedingungen heißen die Komponenten der Bewegungsbeschleunigung:

$$g'_h = g \cdot \frac{(A_h + P_h) - W_h}{G}$$

$$\text{und } g'_v = g \cdot \frac{G - (A_v + P_v + W_v)}{G};$$

der Beharrungszustand tritt ein, wenn $W_h = A_h + P_h$ und $A_v + P_v + W_v = G$. Wächst P_v und P_h fortgesetzt, so wird der Gleitwinkel immer kleiner, die Gleitbahn verflacht sich immer mehr, nähert sich also stets mehr der ~~Geraden~~, bis schließlich bei verschwindend kleinem Gefälle der Gleitflug in den dauernden, wagerechten Schwebeflug übergeht. Für diesen Sonderfall heißen demnach die Bedingungen:

$$(A_h + P_h) - W_h = 0$$

$$\text{und } G - (A_v + W_v + P_v) = 0$$

wobei P_h und P_v die betreffenden Komponenten der Zusatzkraft bedeuten.

Entweder betätigen wir also in einem Gleitflugzeug irgendeine Vorrichtung zur gleichzeitigen Erzeugung von Vortrieb und Auftrieb, oder es wird nur Auftrieb oder nur Vortrieb erzeugt. Der gesamte Energieverbrauch beim Gefälle H läßt sich folgendermaßen schreiben: $E = G.H + P_v . s_v + P_h . s_h$, wobei s_v und s_h die von dem Triebmittel zurückgelegten Wege sind.

Drachenflugzeug. Wird $H = 0$, so haben wir einen Schwebeapparat vor uns, wird auch $P_v = 0$, so handelt es sich um einen Kraftdrachen. Das eigentlich Wesentliche des Drachenflugzeugs liegt also darin, daß bei ihm die motorische Kraft nur einen Vortrieb erzeugt, der dann durch die nach vorn aufgerichtete Neigung seiner Tragflächen in einen Auftrieb umgewandelt wird. Die im vorigen als treibend vermerkte Horizontalkraft A_h ist jetzt der Bewegung entgegengerichtet, so daß sich die Bedingungen des Kraftdrachens folgendermaßen schreiben lassen: $G - (A_v + W_v) = 0$ und $(A_h + W_h) - P_h = 0$ sowie $P_h . s_h - E = 0$. Wird ferner der Tragflächeninhalt F und die schädliche Stirnfläche = S gesetzt, so ergibt sich

$$A = k_1 . \frac{\gamma . v^2}{g} . F ; \quad W = k_2 . \frac{\gamma . v^2}{g} . S$$

worin k_1 und k_2 Erfahrungskoeffizienten, v die Eigengeschwindigkeit des Flugzeugs bedeuten.

Das so gefundene v ist die kritische Geschwindigkeit, die ein Drachenflugzeug gerade besitzen muß, um sein Gewicht tragen zu können; ferner ist der Schwebeflug aber noch von dem Richtwinkel ε abhängig. Beim Grenzfall $\varepsilon = 90^0$ müßte das Gewicht = 0 sein und bei $\varepsilon = 0^0$ könnte ein endlicher Wert der senkrechten Komponente sowohl auf- als abwärts ge-

richtet sein, weshalb das Gleichgewicht nur ein labiles wäre. Innerhalb dieser Grenzen bedingt jeder bestimmte Wert von ε einen ganz bestimmten Wert von v, sobald das Gewicht konstant angenommen wird. Hierbei sollen die geringen Gewichtsveränderungen, die sich in der Praxis durch den Verbrauch an Betriebsmitteln ergeben, vernachlässigt werden.

Steuereinrichtungen. Die Bewegung der Tragdecke ist keineswegs mit der Angabe der Richtung und Geschwindigkeit der Schwerpunktsbahn erschöpft, vielmehr können die Flügel dann noch eine Reihe von Eigenbewegungen ausführen, die von erheblichem Einfluß auf den Flug sind. Dabei sollen alle Eigenbewegungen unberücksichtigt bleiben, die durch irgendwelche Formänderungen herbeigeführt werden, mögen sie nun (falls sie periodisch auftreten) nach einmaliger Erregung abklingen, oder aber durch irgendeine Erregerwelle stets in neue Resonanz treten; es darf jedoch nicht unerwähnt bleiben, daß sie manchmal in geradezu gefahrbringender Weise anwachsen können. Hier sollen nur jene Eigenbewegungen behandelt werden, die in einer Aenderung der Fluglage oder der Neigung des Flugzeugs bestehen.

Die Flugmaschine besitzt im Raum alle sechs Freiheitsgrade; sie kann Verschiebungen in den drei Richtungen des Raumes erleiden und Drehungen um jede ihrer Hauptachsen vornehmen, wobei unter Hauptachsen die Längsachse als Symmetrieachse in der Längsrichtung durch den Schwerpunkt, die Lotachse vertikal auf dieser im Schwerpunkt stehend und endlich die Querachse senkrecht auf diesen beiden stehend verstanden sind. Als Verschiebung soll nur eine, d. i. die in der Flug-Längsrichtung, zugelassen werden; die Flugrichtung (der Kurs) kann sich dann durch Drehung um die Lot- oder Querachse oder um beide gleichzeitig ändern; während ferner bei konstantem Kurs Neigungsänderungen um die Längs- und Lotachse erfolgen können. Quer?

Die Einrichtungen, die zur willkürlichen Erzeugung von Kurs- und Neigungsänderungen dienen, heißen Steuer; das Seitensteuer bestimmt den Kurs; die Längsneigung wird durch das Höhensteuer festgelegt (siehe beide ~~unter 34~~ 87), während außerdem ein Quersteuer zur Einleitung des Kurvenfluges notwendig wird. Diese Quersteuerung bezweckt stets die Vergrößerung des Auftriebs der einen Flügelseite, damit ein einseitiges Aufrichten des Apparates erfolgt. Am vollkommensten wird dies durch eine Verwindung der Tragflächenenden erreicht, wie sie die Wrights zuerst anwendeten, und zwar wird hier das Ende der tieferliegenden Apparatseite nach unten gekrümmt, das der obenliegenden Seite nach oben; erstere erhält dadurch größeren Auftrieb, letztere dagegen einen geringeren. Nun sind aber die Tragflächen an sich schon etwas nach unten gebogen durch die Wölbung, ein Verstärken dieser erhöht also den Stirnwiderstand an dieser tieferliegenden Seite, die dadurch etwas zurückbleibt. Beim Kurvenflug nach links (Fig. 11) wird erst das Seitensteuer gelegt, dann die rechten Tragflächenenden gesenkt, die linken aufgeborgen; durch diesen vermehrten Widerstand verringert sich wieder die Fluggeschwindigkeit, der Apparat sinkt, so daß zum Ausgleich jetzt außerdem noch das Höhensteuer betätigt werden muß. Dieses recht schwierige,

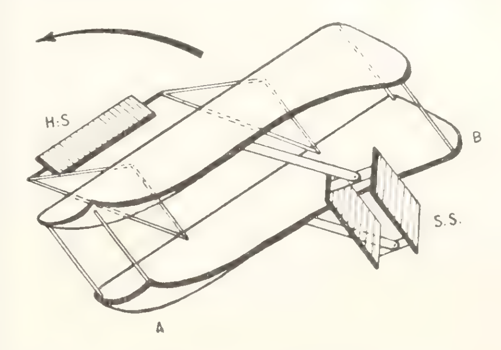


Fig. 11. Erklärung des Kurvenfluges durch die Quersteuerung am Wright-Apparat. Tragflächeseite A hoch gebogen (sinkt deshalb), B nach unten gebogen (wird daher angehoben). Seitensteuer SS nach rechts ausgelegt, Höhensteuer HS aufwärts gestellt.

gleichzeitige Arbeiten mit drei Steuern, wie es beim Wright-Apparat nötig ist, vermeiden neuere Eindecker, indem nur ein Aufbiegen des Tragflächenendes an der höherliegenden Apparatseite erfolgt. Beim Kurvenflug nach links wird links hinten aufgebogen, der Apparat neigt sich links und wenn nun Seitensteuer nach links gegeben wird, legt er sich richtig in die Kurve ein.

Außer der Einleitung solcher Kurven haben alle diese Steuerorgane die Aufgabe, unerwünschte Aenderungen der Flugrichtung einzuschränken oder rückgängig zu machen; bei einigen Ausführungen ist aber ein Flug ohne fortwährende Betätigung derselben überhaupt nicht denkbar; das Flugzeug beginnt, steuerlos geworden, sofort ganz ungeordnete Bewegungen auszuführen, es liegt also nicht stabil in der Luft.

Stabilität. Ist bei einer ebenen, gleichförmig schwebenden bzw. gleitenden Platte die Last so verteilt, daß der Angriffspunkt des Auftriebs C und der Schwerpunkt S zusammenfallen, so ziehen irgendwelche Störungen, die eine Aenderung der Stellung bedingen, stets Verschiebungen vom Druckmittelpunkt nach sich, so daß ein rückdrehendes Moment entsteht, welches die ursprüngliche Stellung wieder herzustellen sucht. Schwieriger gestalten sich diese Verhältnisse

schon bei der gewölbten Platte, weil hier gegebenenfalls eine Verminderung von ε zur Folge haben kann, daß C den Schwerpunkt überschreitet und so das auslenkende Moment unterstützend, ein völliges Kentern herbeiführt. Bei der Tragdecke ist es im allgemeinen nicht möglich, C mit S zusammenfallen zu lassen, man begnügt sich daher, S unter C anzuordnen, so daß im verstärkten Maße ein Rückdrehen stattfindet.

Aber auch hier ist vor einem Zuviel zu warnen, da ein zu groß gewählter Abstand leicht bei der Rückdrehung ein Ueberschreiten der vertikalen Lage und dadurch ein Pendeln hervorruft, das wieder das Auftreten von gefahrbringenden Resonanzerscheinungen begünstigt.

Bei Aufstellung der Stabilitätskriterien, d. s. aller für den stabilen Flug zu erfüllenden Bedingungen, beschränkt man sich in der Regel nur auf kleine Schwingungen und stellt die Gleichungen so auf, daß ein rasches Abklingen derselben erzielt wird. Unter Längsstabilität wird die Eigenschaft verstanden, die nach einer zeitweiligen Störung das Flugzeug wieder in eine dem stabilen Flug entsprechende Bahn bringt, sei sie nun geradlinig oder wellenförmig mit abnehmenden Amplituden. Dies wird erreicht durch das System einer vorn liegenden Haupttragdecke und einer zur Dämpfung dienenden Schwanzfläche, wobei vorausgesetzt ist, daß der Systemschwerpunkt mit dem Druckmittelpunkt der Haupttragfläche zur Deckung kommt. Die Schwanzfläche soll nur als stellungsregelndes Organ wirken, nicht also als Tragdecke; in ihrer unmittelbaren Umgebung hat ja auch die durch die Tragflügel abgelenkte Luft eine andere Richtung als sie sonst der Stromrichtung entspricht. Natürlich wird diese Abweichung mit wachsendem Abstand N der beiden Druckmittelpunkte kleiner. Ist J das Trägheitsmoment des ganzen Systems, so ergibt sich eine gute Längsstabilität, wenn das Verhältnis $\frac{N}{J}$ möglichst groß gewählt wird. J wächst jedoch in einem größeren Verhältnis als N, so daß die zweckmäßige Vergrößerung nur beschränkt ist. Das Verhältnis $\frac{G}{J}$ muß vorteilhaft recht groß bemessen werden. Die Dämpfung ist um so größer, je größer der Flächeninhalt der Schwanzfläche sowie die Eigengeschwindigkeit angenommen wird.

Bei jeder Querneigung tritt eine Gewichtskomponente auf, die eine Kursänderung anstrebt; ihr kann durch feste, in der senkrechten Längsebene liegende Stabilisierungsflächen entgegengewirkt werden, jedoch bringt dies die Gefahr mit sich, daß ein so ausgerüstetes Flugzeug den Einwirkungen unbeständigen Seitenwindes folgt. Besonders schnell würde eine Rückdrehung dann eintreten, wenn die Tragflächen selbst in schwacher V-Form angeordnet würden, dies ist jedoch erstlich eine erhebliche konstruktive Erschwerung, dann aber auch insofern nicht sehr glücklich, als bei normalem Flug die Tragfähigkeit natürlich eine geringere ist, während die beständigen Störungen durch Seitenwind auch auf diese Lösung zutreffen. Im allgemeinen gewährleisten die weit ausladenden Tragflügel bei geeigneter Lastverteilung schon eine genügend kräftige Dämpfung dieser Querschwingungen.

γ) Ausführungen. Die Eindecker bestehen aus einem Haupttragflügel und einem weiter zurückliegenden Schwanzstück, dei den Zweideckern wird entweder Tragfläche oder Schwanz oder aber beide aus einem System von zwei senkrecht übereinander liegenden Flächen gebildet.

Weniger üblich ist, zwei Flächen in gleicher Höhe hintereinander anzuordnen (Reiheneindecker) oder aber in schräg aufsteigender Richtung hintereinander (Treppen- oder Stufendecker) jedoch findet eine gewisse Staffelung der beiden Tragflügel immer mehr Anklang.

Die Tragflügel bestehen meist aus einem Holzgerüst, das mit besonders festen Aeroplanstoffen überzogen ist, bisweilen aber auch aus einer Schicht schräg verleimter dünner Hölzer, endlich aus dünn gewalztem (Aluminium-)Blech. In neuerer Zeit werden auch einzelne Teile des Flügels, bei denen eine Durchsicht erwünscht ist, aus glasklarem Celluloid ausgeführt, dessen Festigkeit recht befriedigend erscheint.

Gerüst usw. Das Gerüst wird in der Hauptsache aus in der Flugrichtung liegenden Tragrippen gebildet, die sich wieder auf quer verlaufende Holme stützen und außerdem durch einen Querverband verstärkt sind. Wird die Flächenbelastung ziemlich hoch angenommen (z. B. bei Eindeckern), werden sowohl die Holme als auch die Tragrippen häufig als Gitterträger ausgebildet und das ganze Gerüst dann beiderseits bespannt. Bei den Zweideckern, bei welchen die Flächenbelastung eine wesentlich geringere ist, kommen viel schwächere, aus dem Vollen heraus gearbeitete Rippen zur Verwendung; das Gerüst wird dann häufig nur auf der Druckseite bespannt, während die auf der Oberseite vorstehenden Rippen durch schmale Stoffstreifen überlascht sind. Die Festigkeit der Holme genügt jedoch nicht, die ganze Last vollständig frei zu tragen, vielmehr muß an vielen Stellen, vornehmlich aber an den Enden eine Unterstützung eintreten, die in den meisten Fällen durch Spanndrähte erreicht wird, die ihrerseits wieder an in

der Mitte des Rumpfes aufgerichteten Masten aufgehängt werden.

Diesen Spanndrahtverspannungen wohnen manche Nachteile inne, die es ratsam erscheinen lassen, ihre Verwendung tunlichst einzuschränken. Erstlich sind besondere Spannschlösser notwendig, um sie stets gespannt zu halten (ein einigermaßen gleichmäßiges Beanspruchen sämtlicher Drähte wird trotzdem nicht annähernd erreicht). Sie bedürfen daher stets sorgfältigster Wartung, können nicht ihrer Festigkeit entsprechend beansprucht werden und bieten ferner einen recht erheblichen Luftwiderstand. Besser sind die in letzter Zeit gebräuchlichen Stahlbänder.

Wesentlich leichter lassen sich Zweidecker mit der nötigen Festigkeit herstellen, wenn die beiden Tragflügel durch Stützen zu einem einzigen Träger verbunden sind; hier dienen dann die Spanndrähte lediglich dazu, die Diagonalsteifigkeit herzustellen. Je größer der Abstand zweier Flügel bemessen wird, desto vorteilhafter ist dies für die zulässige Flächenbeanspruchung desselben, doch setzt das mit dieser Vergrößerung wachsende Eigengewicht zu großem Abstand bald eine Grenze.

Die Tragrippen sind meist an der Tragseite leicht gewölbt ausgeführt, am letzten Teil auch biegsam elastisch, um ein leichtes Abfließen der Luft zu gewährleisten. Bei letzterer Ausführung darf dann der elastische Teil nicht mit zur Tragfläche gerechnet werden, da er nicht nur nicht mitträgt, sondern auch eventuell Wind von oben, also Abtrieb erhalten kann.

Die Grundrißgestaltung der Flügel ist bei Zweideckern meist rechteckig, bei Eindeckern dagegen sehr verschieden.

Eine gewisse Abrundung der Form, auch ein leichtes Verjüngen an den Enden (Anlehnen an den Vogelflügel sowie an den gut gleitenden Samen) ist jedenfalls von Vorteil; geschieht die Quersteuerung durch Verwindung der Enden, so ist eine sehr schlanke Verjüngung der Flügelenden unzweckmäßig, werden dagegen besondere Hilfsklappen hierzu benutzt, so lassen sich diese irgendwie jeder Grundrißform anschließen. In großen Zügen gemessen liegen die gebräuchlichsten Werte des Seitenverhältnisses zwischen den Grenzen L/B = 4,5 bis 6,5.

Zweidecker. Die gegenwärtig erfolgreichen Flugmaschinen lehnen sich in der Hauptsache an zwei Grundformen an, und zwar richten sich die Zweidecker zumeist nach dem Voisin-Typ, die Eindecker nach dem Bleriot-Apparat, wobei sämtliche Konstruktionen mehr oder weniger die grundlegenden Prinzipien der Wrightschen Maschine weiter ausbauen. Der Wright-Apparat, einfach aus einem Gleitflugzeug entstanden, dem ein besonderer Vortriebsmechanismus eingebaut wurde, bietet als Augenfälligstes die Tragzelle, d. h. die beiden übereinander angeordneten Tragflügel, welchen die Steuerorgane hinten bezw. vorn angesetzt sind, während der Motor auf dem unteren Tragdeck steht und zwei Propeller gegenläufig antreibt.

Diese gewollte Einfachheit war außer den weitgehenden Patentansprüchen der Wrights vielleicht der Hauptgrund, daß ihre Maschine eigentlich keine direkten Nachahmer fand. Die Maschinenanlage hatte in dem Tragflügel ein sehr schlechtes Fundament, die Unterbringung des Führers auf der Vorderseite des Flügels war nicht sehr glücklich und endlich erschwerte der Verzicht auf automatische Längsstabilität das Fliegenlernen in hohem Maße.

Bei Voisin dagegen finden wir zunächst für die Längsstabilität ein besonderes als Kasten ausgeführtes Schwanzstück, Motor und Propeller sitzen auf einem besonderen Rumpf, der sich über dem Anlaufgestell aufbaut, vorn das Höhensteuer trägt und in die eigentliche Tragzelle passend eingesetzt ist. Die Quersteuerung geschieht bei diesem Zweidecker, weil die Verwindung geschützt war, durch die Betätigung besonderer, dem oberen Tragdeck angehängter Hilfsklappen.

Diese hängen in der Ruhe lose herunter, stellen im Fluge sich horizontal ein und können nun nach Bedarf etwas heruntergezogen werden, wodurch der Apparat an dieser Seite gehoben wird.

Der Voisin-Apparat von Euler läßt noch deutlich die beiden getrennten Teile — das Gestell und die eigentlichen Flügel — erkennen, zwischen denen keine organische Verbindung besteht. Beim Farman-Apparat der Albatros- und Aviatik-Werke haben wir dagegen eine ausgesprochene Flügelkombination vor uns, der sich dann nur das Anlaufgestell angliedert.

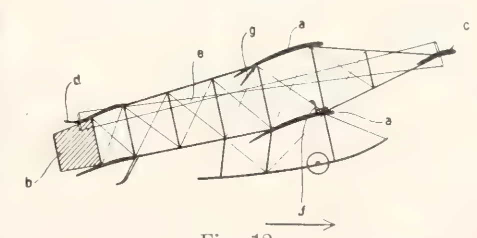


Fig. 12.
Farman-Albatros-Aviatik-Zweidecker.
a Tragflächen, b Seitensteuer, c Höhensteuer, d beweglicher Teil der oberen Schwanzfläche, e Verbindung von c mit d, f Sitz, g Hilfsklappen zur Quersteuerung.

Ein leicht gefügter Gitterträger kreuzt sich mit der Tragzelle, der oben die Hilfsklappen für die Quersteuerung angeschlossen sind; auf dem verstärkten unteren Flügel ist Motor, Propeller und Führersitz angeordnet; der in der Flugrichtung durchlaufende Gitterträger trägt vorn das einfache Höhensteuer, während er hinten in eine Schwanzzelle endigt, in die wieder das doppelflächige Seitensteuer eingelassen ist. Beim Höhensteuer ist noch die Einrichtung getroffen, daß es durch Seile mit dem

hinteren Ende der oberen Schwanzfläche verbunden ist; beide ergänzen sich also, so daß eine gefahrbringende Einwirkung des Windstromes ausgeschaltet ist.

Die moderne Wright-Maschine hat auch in vielen Punkten ein anderes Aussehen erhalten; die Anbringung des Motors auf dem unteren Tragdeck ist dieselbe geblieben, vielfach ist jedoch direkte Kupplung mit dem Propeller vorgesehen, der Führersitz ist etwas vor die Zelle gerückt, so daß er nach allen Seiten einen freien Ueberblick gewährt. Auf eine besondere Schwanzfläche ist auch jetzt noch verzichtet, jedoch sind beide Steuer nach hinten gerückt, die Verwindung als Quersteuerung ist beibehalten.

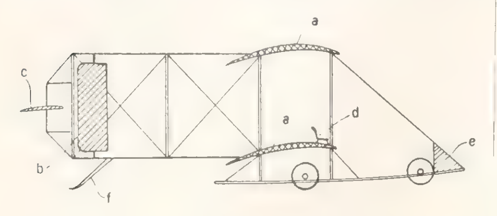


Fig. 13. Schema des neuen deutschen Wright-Apparates. a Tragflächen, b Seitensteuer, c Höhensteuer, d Sitz, e feste Vertikalfläche, f hinterer Sporn.

Statt der beiden Kufen, die als einzige Anlaufserleichterung vorgesehen waren, sind nunmehr vorn 2 bis 4 Anlaufräder, hinten ein Gleitsporn angeordnet.

Eindecker. Beim Eindecker sind die ersten tastenden Versuchsstadien abgeschlossen, die ursprünglich weit auseinander führenden Entwürfe haben sich mehr und mehr genähert, so daß wir hier schon bestimmte Normalien festlegen können.

An ein langes bootsförmiges Gestell (den Rumpf), das vorn etwas stumpf, hinten dagegen sehr schlank verläuft, gliedern sich vorn beiderseitig die Tragflügel an, während am hinteren Ende die verschiedenen Steuerorgane angeschlossen sind. So ergibt sich auch zwanglos die weitere Verteilung; der Motor mit kurz angeschlossenem Propeller sitzt am Kopf des Rumpfes unmittelbar vor den Sitzen und den Betätigungshebeln, so daß beides unter Aufsicht ist. Dadurch erhalten die Hauptflügel fast die ganze Last; die sich hinten anschließende Schwanzfläche kann dagegen recht leicht ausgeführt werden, so daß sie zwar genügend wirksam für Längsstabilität bleibt, aber doch den willkürlichen Neigungsänderungen durch den Führer keinen zu großen Widerstand entgegensetzt. Nach unten setzt sich der Rumpf in das Anlaufgestell fort, das entweder für sich als geschlossenes Ganzes ausgebildet ist und dann gegen den Rumpf abgefedert wird oder aber fest mit dem Rumpf verbunden ist und dann besonders gute Federung an den Rädern aufweist. Vorn besteht es zumeist aus 2 bis 4 Rädern, die sich selbsttätig in die Laufrichtung einstellen können, hinten wird dagegen allgemein nur ein Schleifsporn angeordnet, der lediglich als Stütze dient und beim Anlauf sich sofort vom Boden erhebt. Die Seiten- und Höhen-Steuerorgane werden stets an das hintere Ende des Flugzeugs gelegt, die Quersteuerung geschieht entweder durch Verwindung der Hauptflächenenden oder aber durch Verdrehung besonderer seitlicher Verlängerungen derselben.

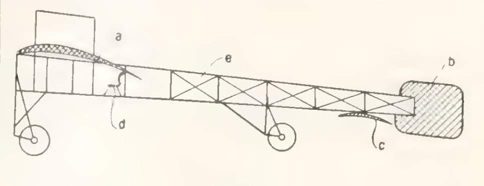


Fig. 14. Schema des Blériot-Apparates, Typ 1909. a Tragfläche, b Seitensteuer, c Höhensteuer, d Sitz, e durchlaufendes Gestell.

Im Bleriot-Apparat finden wir eigentlich schon alles Vorhergesagte vereinigt; der Rumpf nimmt vorn den Motor und Propeller, weiter zurück den Führer auf und trägt hinten die Steuer; auf dem ersten Drittel schließen sich ihm beiderseitig die Tragflügel an, während ganz hinten die Schwanzfläche sitzt; zur Quersteuerung werden die Hilfsflächen einer Seite gleichförmig verdreht. Einen ganz ähnlichen Aufbau, nur eine andere Grundrißgestaltung zeigt der Eindecker von Etrich-Rumpler (nach den ersten Entwürfen von Wels gebaut).

Die Rumpfanordnung ist ganz übereinstimmend, nur besteht das Anlaufgestell schon aus einer Mittelkufe und zwei Rädern, während sowohl an den Enden der Tragflügel und zwar an den Masten für die Verwindung als auch unter der Schwanzfläche Sporne vorgesehen sind. Das Höhensteuer wird nicht um eine feste Achse scharnierartig gedreht, sondern auf- oder abgebogen, die Quersteuerung geschieht durch schärferes Aufbiegen der von vornherein leicht aufwärts gebogenen Flügelenden, jedoch stets nur an einer Seite im Gegensatz zu Wright (s. 89). 148

Grundsätzlich andere Bauformen zeigt eine zweite Art Eindecker, die von der undurchbrochenen Tragfläche ausgehen, weil diese natürlich bei gleicher Beanspruchung viel leichter im Gewicht auszuführen ist. Die Last muß dann folgerichtig unter dem Flügel aufgehängt werden, so daß sich ein System von Tragfläche und Schwanzstück, durch ein leichtes Verbindungsgestell vereint, ergibt, dem die Sitze, sowie die Maschinenanlage unten eingebaut ist.

Auch hier liegt der Motor meist vorn, der Propeller wird jedoch häufig (wie beim Dorner-Flugzeug) hinter dem Hauptflügel angebracht; dadurch läßt sich einmal durch ein passendes Uebersetzungsverhältnis ein langsam

laufender Propeller mit besserem Wirkungsgrad verwenden, dann ist der Abstrom desselben nicht behindert und endlich ist die Flächenausnutzung des Tragflügels in diesem Fall eine günstigere.

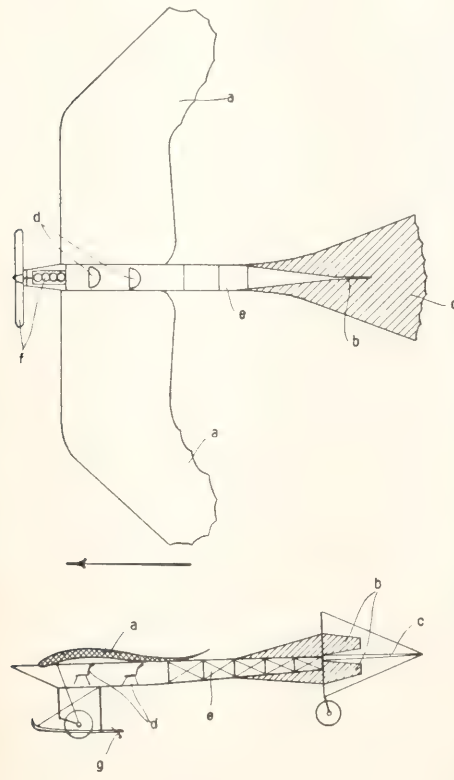


Fig.15. Etrich-Rumpler-Eindecker. a Tragfläche, b Seitensteuer, c Höhensteuer, d Sitze, e Gestell, f Motor und Propeller, g Bremssporn beim Landen.

S t a r t v o r r i c h t u n g e n. Die bisher besprochenen Drachenflugzeuge besitzen nur die Fähigkeit, sich durch ihren Vortrieb eine Horizontalgeschwindigkeit zu erteilen, müssen also beim Abflug die zum Schweben kritische Geschwindigkeit erreichen. Abgesehen von einem Vorschlag von H o f m a n n , nach welchem das Flugzeug durch ein Gerüst gehoben, dann ausgeklinkt und so erst in den Gleitflug versetzt werden soll, suchte man die Abfluggeschwindigkeit dadurch zu erzielen, daß die Energie eines durch Schnüre mit dem Apparat verbundenen Fallgewichts dem Motor als Zusatzkraft beigegeben wurde, wie es noch jetzt bei beschränkten Startverhältnissen (Schiffen) empfehlenswert wäre. W r i g h t s vermieden dann auch die Räder und ließen den Apparat mit seinen Kufen auf einer Schiene abfliegen. Neuerdings verzichtet man auf diese Zusatzkraft, rüstet den Apparat mit leichten Anlaufrädern aus und läßt das Flugzeug durch seine eigene Motorkraft anlaufen, wobei durch möglichst horizontale Stellung der Flächen der Stirnwiderstand gering gehalten wird.

S c h w i n g e n - u n d S e g e l r a d f l u g z e u g e. Außer den bisher betrachteten Drachenflugzeugen haben einige F l u g m a s c h i n e n unmittelbar den Aufbau der F l u g t i e r e zum V o r b i l d genommen.

Das Vorbild der Natur kann für uns aber insofern nicht bestimmend sein, als für sie stets die Notwendigkeit vorliegt, alle Bewegungsorgane zu ernähren, also durch Nervenbündel und Adern mit der Zentrale zu verbinden, während unsere moderne Technik bestrebt sein muß, die vom Motor erzeugte Rotation unmittelbar auszunutzen, hin und hergehende Massen dagegen nach Möglichkeit zu vermeiden.

Daher können auch alle reinen S c h w i n g e n f l u g z e u g e , die auf der Ausübung und Unterhaltung von intermittierenden, gleichförmig beschleunigten und verzögerten Flügelschlägen beruhen, nur beschränkte Bedeutung erlangen. Etwas mehr Erfolg versprechen die Bemühungen, die Tragflächen in mehrere Einzelflügel aufzulösen, auf ein System nach Art der Schaufelräder zu verteilen, welches dann wieder durch den Motor angetrieben wird (S e g e l r a d f l u g z e u g e).

S c h r a u b e n f l u g z e u g e. Am aussichtsreichsten dürften jedoch die S c h r a u b e n f l u g z e u g e sein, bei denen die Tragfläche lediglich durch eine große Tragschraube ersetzt wird. Ein derartiges System kann von jedem Ort sofort aufsteigen, ihm wohnt jedoch die große Gefahr inne, durch Verzicht auf jede eigentliche Tragfläche beim Versagen des Motors nicht die Möglichkeit des Gleitfluges zu besitzen. Die Ausführungen scheiden sich in die beiden Arten, daß entweder nur e i n e große Hubschraube verwendet wird oder daß diese durch eine große Zahl kleiner Hubschrauben ersetzt wird, die über dieselbe Grundfläche verteilt sind. Damit auch wirklich die Schraube sich dreht und nicht etwa die Maschinenanlage, muß die Reaktion dieser Drehung durch senkrecht stehende Flächen ausgeglichen werden bezw. die Reaktion wird durch ein System gegenläufiger Schrauben vermieden. Ein Vortrieb läßt sich einfach in der Weise erzielen, daß das ganze System schräg gelegt wird. Der Gefahr, daß eine einmal schief fliegende Schraube beim weiteren Steigen sich allmählich immer weiter neigt und schließlich überkippt, wird in ähnlicher Weise wie beim Fallschirm dadurch zu begegnen sein, daß die Schraubenflügel schräg zur Achse stehen, so daß sie einen nach oben offenen Trichter bilden.

δ) Motoren. Die jetzt in der Luftfahrt gebräuchlichen Motoren stehen noch gänzlich unter dem Einfluß der Automobilindustrie. Mit Recht wird aber nunmehr begonnen, Spezialmotoren zu schaffen, die lediglich ihren neuen Verwendungszweck berücksichtigen. Als Kraftstoff kommen ausschließlich Brennstoffe mineralischen Ursprungs in Betracht, die in hervorragendem Maße die Eigenschaft besitzen, große Kräfte zu entfalten, ohne jedoch bei geringstem Gewicht einen großen Raum zu beanspruchen. Diese Stoffe — Benzin, Petroleum und (wenn auch in geringerem Maße) Benzol — werden in besonderen Spritzvergasern zerstäubt, mit der nötigen Luftmenge in innige Berührung gebracht und im geeigneten Augenblick in einem Zylinder verbrannt.

Diese Verbrennung geht explosionsartig vor sich und die hiermit verbundene erhebliche Raumvergrößerung wird zur Arbeitsverrichtung benutzt. Zur vollkommenen Verbrennung des betreffenden Stoffes ist eine bestimmte Luftmenge nötig, woraus sich das theoretische Mischungsverhältnis ergibt; erfahrungsgemäß muß jedoch mit einem gewissen Luftüberschuß gearbeitet werden, so daß es nun auf die Erreichung des wirtschaftlich günstigsten Mischungsverhältnisses ankommt. Bei sämtlichen Luftfahrzeugmotoren wird der Brennstoff außen mit der Verbrennungsluft gemischt und dann erst in den Zylinder eingeführt (äußere Gemischbildung).

Das Arbeitsspiel der Viertaktmaschine umfaßt 4 Hube: das Ansaugen, die Verdichtung, die Ausdehnung und die Verdrängung; eigentlich arbeitsleistend ist hiervon nur die Ausdehnung. Da es nun sehr darauf ankommt, den Zylinder vor einer neuen Ladung gänzlich rein zu haben, so fügt man den 4 Huben noch 2 weitere hinzu, nämlich ein Ansaugen von Luft und eine erneute Verdrängung der nunmehr gebildeten Mischung; dieses Arbeitsspiel der Sechstaktmaschine wird dadurch etwas günstiger, es erzielt gleichzeitig eine gute Innenkühlung, aber das Drehmoment ist bedeutend ungleichförmiger. Bei der Zweitaktmaschine dagegen haben wir nur den Verdichtungshub und darauf die Ausdehnung; kurz vor Ende der Ausströmung wird durch eine besondere Spülpumpe ein scharfer Spülluftstrahl eingeblasen, darauf sofort das Brennstoff-Luft-Gemisch, worauf die Verdichtung beginnt. Dieser Zweitaktmotor hat den Nachteil, nur bei einer bestimmten Tourenzahl und Belastung richtig und mit geringem Brennstoffverbrauch zu funktionieren, er ist also in bezug auf Drehmoment und Umdrehungszahl nicht so variabel.

Die vorgenannten Arbeitsvorgänge spielen sich bei Luftmotoren meist nur auf einer Kolbenseite ab (einfach arbeitende Maschinen). Der Wirkungsgrad hängt in der Hauptsache von der Reinheit und günstigen Zusammensetzung der Ladung, von der hohen Verdichtung, kräftig wirkenden Zündung und richtigen Lage des Zündungspunktes, Einschränkung der Eigenverdrängungs- und Ansaugewiderstände, sowie peinlicher Genauigkeit und Sauberkeit der Ausführung ab.

Besonders erschwerend ist für das Arbeiten der Luftmotoren die wechselnde Höhe und die hierdurch hervorgerufene Verringerung des Luftdruckes, die sich dadurch bemerkbar macht, daß das gleichmäßig angesaugte Luftgewicht ungefähr im Verhältnis der äußeren Luft abnimmt; der Verdichtungsgrad des Gemisches sinkt also und mit ihm geht die Leistung des Motors zurück, wobei allerdings zu erwähnen ist, daß auch die Verdrängungswiderstände sich etwas verringern.

Als wichtigste Forderung für einen Luftmotor ergibt sich die Betriebssicherheit und Zuverlässigkeit, die allen sonstigen Eigenschaften desselben vorangestellt werden sollte; hierzu ist außer einer guten Dauerleistung, die voraussichtlich mit der weiteren Entwickelung sich stets steigern wird, eine leichte Zugänglichkeit zu allen einer Abnutzung unterworfenen Teilen unbedingt notwendig, damit bei kleinen Betriebspausen ein Ueberholen und eventuelles Auswechseln stattfinden kann. Weiter ist ein guter Massenausgleich und ein erschütterungsfreier Gang zu fordern, weil das Fundament stets das denkbar leichteste bleiben wird und weil ferner durch diese Eigenschaft vielleicht noch konstruktive Erleichterungen für die Flugzeuge zu erwarten stehen. In zweiter Linie ist ein geringes Einheitsgewicht, d. h. ein geringes Gewicht für die abzugebende Leistung, sowie ein geringer Verbrauch an Betriebsstoffen anzustreben; besonders der letzteren Eigenschaft ist eine große Bedeutung beizulegen, weil bei den größeren Flügen der Gesamtvorrat schon ein erhebliches Gewicht repräsentiert und bei Luftschiffen außerdem der durch den Verbrauch hervorgerufene vermehrte Auftrieb störender ist als ein von Anfang an vielleicht etwas größeres Gewicht, das dann aber nur eine geringfügige Verringerung durch den Verbrauch erleidet. Keineswegs darf das Bestreben, ein geringes Einheitsgewicht zu schaffen, dazu verleiten, etwa an Organen zu sparen, die für die Betriebssicherheit unerläßlich sind.

Ausführungen. Die bis jetzt unter tunlichster Berücksichtigung der vorerwähnten Gründe geschaffenen Luftmotoren lassen sich in Motore mit zum Fahrzeug feststehenden Zylindern und in solche mit zum Fahrzeug beweglichen Zylindern unterscheiden. Die erste Bauart sieht folgende Anordnungen vor:

1. Sämtliche Zylinder sind in *einer* zur Kurbelwelle *parallelen* Ebene angeordnet; dann treibt jeder Kolben eine besondere Kurbel.

Bei 2 Zylindern werden die Kurbeln um 180° gegeneinander versetzt; bei 4 Zylindern ergeben sich 2 Paar um 180° versetzter Kurbeln; 8 Zylinder bilden eine Verdoppelung der vorigen Anordnung, jedoch wird ein Satz gegen den anderen um 90° versetzt; so gelangt man von einem Motor mit gänzlich unausgeglichenem Drehmoment zu einer Maschine, bei der freie Momente ganz vermieden sind, freie Kräfte aber nur in geringem Umfang auftreten. Endlich wird noch die Anordnung von 6 Zylindern mit um 60° versetzten Kurbeln getroffen, hier sind freie Kräfte und Momente ganz vermieden, jedoch ist das Drehmoment nicht ganz so gleichförmig wie bei der vorigen Bauart.

2. Die Zylinder sind auf *zwei* konvergierende zur Kurbelwelle *parallele* Ebenen verteilt, also in V-Form angeordnet; es arbeiten je zwei Zylinder auf eine Kurbel, wodurch Baulänge und Gewicht fast um die Hälfte verringert wird; die Steuerung vereinfacht sich etwas, die Zugänglichkeit der Einzelteile wird durch den verwickelteren Aufbau wesentlich erschwert.

3. Die Zylinder werden auf *eine* oder *zwei* Ebenen *normal* zur Kurbelwelle verteilt — Stern- oder Fächeranordnung; die Vor- und Nachteile der vorigen Bauart sind gesteigert.

Die ~~zweite~~ 3. *Anordnung* umfaßt die *Umlaufmotoren*, bei denen sich als Vorteil ein sehr geringes Einheitsgewicht und unmittelbare Luftkühlung ergibt, weil die rotierenden Zylinder gleichzeitig als Schwungmaße dienen; ihr verwickelter Aufbau erschwert jede Zugänglichkeit, die Rotation verbietet eine sorgsame Ueberwachung und auch eine hinreichende Regulierbarkeit der Betriebsstoffe.

Einzelteile. Die *Leistung* des Motors hängt hauptsächlich vom Mischungsverhältnis des Brennstoffes mit der Luft ab, dieses läßt sich nun dadurch regulieren, daß entweder die Luftmenge oder aber die Brennstoffmenge geändert wird; beides geschieht im *Spritzvergaser*; dieser besteht aus einem Behälter, in welchem der Brennstoff durch verschiedene Vorrichtungen an einer mittleren Düse mit flachem Meniskus gehalten wird, ohne aber von selbst auszufließen. Während des Betriebes strömt nun die Ansaugeluft an dieser Düse vorbei und reißt durch dynamische Druckänderung einen Teil des Brennstoffes mit, indem es ihn gleichzeitig fein zerstäubt.

Die Zerstäubung und Gemischbildung wird desto gleichmäßiger, je mehr sich der Luftstrom einer stationären Strömung nähert, weshalb es durchaus vorteilhaft ist, mehrere Zylinder von einem Vergaser zu speisen. Irgendwelche Neigungsänderungen des Fahrzeugs dürfen keinerlei Einfluß auf die Lage der Düsenmündung zum Brennstoffniveau haben, damit kein Ausfließen des Brennstoffes, aber auch keine Unterbrechung der Speisung stattfindet.

Als *Ein- und Auslaßorgane* am Zylinder werden hauptsächlich *Kegelventile* vorgesehen (in neuerer Zeit auch Schieber), die für möglichst große Querschnitte dimensioniert werden, so daß sich ungefähr eine Ansaugegeschwindigkeit von 55 m/sec ergibt; diese Ventile werden durch Spiralfedern gegen ihren Sitz gedrückt und durch besondere Schwinghebel, die wieder durch eine Nockenwelle gesteuert werden, betätigt. Um an Platz zu sparen, wird manchmal eine Vereinigung beider Ventile zu einem ineinander geschachtelten Doppelventil vorgenommen.

Kühlung. Durch die hohen Verbrennungstemperaturen würden die Zylinderwandungen sehr bald unbrauchbar werden, wenn nicht durch besondere Vorrichtungen eine geeignete Abkühlung herbeigeführt würde. Als Kühlmittel dient in letzter Linie immer die *atmosphärische Luft*, jedoch sind 2 Anwendungsarten zu unterscheiden. Entweder werden die zu kühlenden Teile (die Zylinder und die Auslaßleitung) *direkt* einem *Luftstrom* ausgesetzt, oder sie werden durch einen im Kreislauf fließenden *Wasserstrom* gekühlt, der dann seine erhöhte Temperatur wieder an die Luft abgibt.

Der bei der *unmittelbaren Luftkühlung* nötige Luftstrom wird entweder durch den bei der Fortbewegung sich ergebenden Luftstrom gebildet oder durch Rotation der Zylinder um die Achse noch besonders verstärkt, oder aber er wird durch einen besonderen Ventilator erzeugt, der ihn dann zwischen die betreffenden Wandungen und eine Blechhülle preßt. Im ersten und letzten Fall haben wir es mit dem stehenden Motor mit senkrechter, V-förmiger, Stern- oder Fächeranordnung der Zylinder zu tun, im zweiten mit den Umlaufmotoren.

Der natürliche Luftstrom des Fluges reicht nicht aus, die Wandungen genügend zu kühlen, auch eine Rotation der Zylinder hat noch den Nachteil, daß die Stirnseite der Zylinder im relativen Luftstrom intensiver gekühlt wird, als die Rückenseite; wird aber ein Ventilator zur Verstärkung des Luftstromes benutzt, so erfordert dieser seiner Abmessung wegen einen erheblichen Teil der Motorenleistung. Daher ist allgemein die *mittelbare Kühlung* durch einen Wasserstrom vorzuziehen, der seine Rückkühlung in einem Wärmeaustauschgefäß, *dem Kühler*, erhält. Beim Kühler fließt entweder das Wasser durch flache dünnwandige Röhrchen oder es umspült dieselben, während die Luft die andere Rohrwand bestreicht. Bei Luftschiffen, die eventuell mit sehr geringer Geschwindigkeit fahren, empfiehlt sich zur Verstärkung des Luftstromes für den Kühler ein kleiner Ventilator.

Armaturen. Die stets reichlich zu bemessende Auspuffleitung mündet bei Luftschiffen erst in ein Sammelrohr, um Flammenbildung mit Sicherheit zu vermeiden. Die Schmierung der Einzelteile geschieht zwangläufig durch eine besondere Schmierpumpe, deren Fördermenge am besten von der Leistung des Motors abhängig gemacht wird. Da eine Regulierbarkeit in weiten Grenzen bei den Luftmotoren nicht zu erreichen ist, schaltet man bei Luftschiffen, falls geringere Leistungen nötig werden, einen Motor ab; bei einem zeitweiligen Gleiten des Flugzeugs wird der Motor aber nur gedrosselt, damit er sofort wieder anspringt.

ε) *Propeller.* Das Grundprinzip für die Erzeugung jeglichen *Vortriebs* in einer Flüssigkeit besteht in der Ausnutzung der Trägheitskraft derselben.

Diese *Trägheitskräfte* können nun auf dreierlei Arten hervorgebracht werden, nämlich 1. durch *Erzeugung* eines nach hinten gerichteten gleichförmig beschleunigten *Luftstromes*, 2. durch *Strahlungsdruck*, d. i. den Rückstoß einer von einer Strahlungsquelle ausgesandten elastischen Wellenenergie und 3. durch den *Bewegungswiderstand* der Luftmengen, die von einem flügelartigen Körper bei seiner ruckförmigen Bewegung mitgerissen werden, wie es für alle Schwingen und Segelradflugzeuge in Frage käme. Die unter 2. und 3. erwähnten Möglichkeiten haben bisher keinerlei praktische Bedeutung erlangen können; ebensowenig bei 1. die Versuche, diese Reaktion durch einen hochgespannten Rückstrom von großer Geschwindigkeit, aber kleinem Querschnitt zu erreichen.

Daher sollen hier nur die Schraubenpropeller besprochen werden, die einem Luftstrom von verhältnismäßig großem Querschnitt eine geringe Geschwindigkeit erteilen.

Luftschrauben. Die Unterscheidung der Luftschrauben geschieht nach ihrem Zweck in *Treib-* und *Hubschrauben*; nach ihrer theoretischen Bauweise in Propeller mit *konstanter* und *veränderlicher Steigung*, sowie in Propeller mit *ebenen* und *gewölbten Flügeln*; nach ihrer Konstruktion in Propeller mit *starren*, *verstellbaren* und *unstarren* Flügeln. *Rechtsgängig* ist ein Propeller, wenn er, von hinten in Flugrichtung gesehen, in Uhrzeigerrichtung umläuft. Unter *Steigung* versteht man die parallel zur Achse gemessene Höhe eines vollen Schraubenganges; konstante Steigung entspricht der mathematischen Schraube, veränderliche Steigung bedeutet ein Anwachsen derselben entweder radial, achsial oder in beiden Richtungen. Die Steigung wird meist auf die Druckfläche bezogen, d. i. die in der Beschleunigungsrichtung einen Druck auf die Luft ausübende Fläche; in neuerer Zeit wird jedoch auch der Sogfläche eine größere Aufmerksamkeit geschenkt.

Rechnungsgang. Die Berechnungen greifen vornehmlich auf zwei Theorien zurück: 1. *Die Flügelblatt-Theorie*: sie geht von der Einwirkung des Flächenelements auf die Luft aus, wenn eine Ebene mit einer aus der Drehung und den Vortrieb resultierenden Geschwindigkeit schief durch die Luft hindurch gezogen wird, berechnet Geschwindigkeit, Kraft und Arbeiten lediglich für dieses Element und dehnt dann die Betrachtung auf den ganzen Flügel aus. 2. Die *Schraubenstrahl-Theorie* beschäftigt sich mit der Luftmasse, die durch Vermittelung der Schraubenflügel in der Zeiteinheit in geschlossenem Strahl entgegengesetzt zur Fahrtrichtung beschleunigt wird. Die dadurch entstehende Reaktion wird von der Schraube aufgenommen und durch ihre Welle auf das Fahrzeug übertragen.

Dabei ist bisher stets die Annahme gemacht, daß wegen der geringen achsialen Länge der Schraube eine Beschleunigung der Luft im Propeller nicht stattfindet, sondern daß diese durch Ansaugen *vor* dem Propeller bereits von der Fluggeschwindigkeit auf die größere Ausstoßgeschwindigkeit beschleunigt ist.

Gemäß ihren Ausgangspunkten geben die erwähnten Theorien keinen Aufschluß über die zweckmäßige Flügelzahl; nach den Versuchen von *Riabouchinski* ist jedoch eine merkliche Steigerung des Wirkungsgrades nur bis zu 4 Flügeln festzustellen, so daß kein Grund vorliegt, diese Zahl bei Treibschrauben zu überschreiten. Bei Standversuchen wächst der Schub mit dem Quadrat, die Leistung mit der dritten Potenz der Tourenzahl, was für Kontrollzwecke von großer Bedeutung ist.

Es ist natürlich zweckmäßig, auch den Schraubenflügeln die vorhin als so nützlich erkannte Wölbung zu geben, da hierdurch eine erhebliche Steigerung des Wirkungsgrades zu erzielen ist. Ist die Steigung und die Gestaltung eines Flügels an seiner Druckseite festgelegt, so werden die nötigen Wandstärken ermittelt und diese zu einer glatt verlaufenden Fläche — *der Sogseite* — verbunden.

Für die Festigkeit der Schraubenflügel sind folgende Kräfte und Momente zu berücksichtigen: Zentrifugalkraft, biegendes Moment des Achsialschubes, Biegungsmoment durch die Uebertragung des Drehmomentes. Diese Kontrolle wird für verschiedene Querschnitte und besonders für den Nabenansatz durchgeführt.

Die Schrauben werden 1. ganz aus Holz hergestellt und zwar aus einem Stück geschnitzt oder aus verschiedenen Schichten übereinander zusammengesetzt oder kreuz und quer verleimt und heiß gepreßt; 2. aus Metall, entweder aus Stahlblech gedrückt mit einer verstärkten Nabe oder aus Aluminiumblechflügeln, die an Stahlarme angenietet sind; 3. werden besondere Metallrahmen mit

irgendeinem festen Stoff überzogen und so sehr leichte Flügel gebildet; 4. gibt es noch ganz unstarre Schrauben, deren Flügel nur aus Stoff bestehen, der sich bein Betrieb durch die Zentrifugalkraft eingelegter Schwunggewichte straff hält. Vielfach werden Propeller so gebaut, daß die Flügel während des Betriebes etwas verstellt werden können, um sich in geringem Maße nach der notwendigen Leistung zu richten; ferner wird von vielen Konstrukteuren für ihre Luftschraube veränderliche Steigung vorgesehen, obgleich deren genaue Herstellung wesentlich schwieriger als bei den bisherigen ist.

Theoretisch ist ein Zunehmen der Steigung von der Eintritts- zur Austrittskante wohl berechtigt, weil durch sie der Luftbeschleunigung im Propeller mehr Rechnung getragen wird, jedoch bedarf es dann einer genauen Feststellung, welches Quantum Luft vor und welches im Propeller beschleunigt wird.

Hubschrauben. Für Hubschrauben, wie sie bei Schraubenflugzeugen Verwendung finden sollen, können im allgemeinen die gleichen Grundsätze gelten. Meist soll ja die Eigengeschwindigkeit dieser Schrauben nur gering sein (sofern es sich um ein Schweben handelt sogar gleich 0), daher können die Hubschrauben in der Hauptsache wie am festen Punkt arbeitende Schrauben behandelt werden. Bei ihnen ist daher auch eine Vergrößerung der Flügelzahl mit gleichzeitiger Verkleinerung der Flügelfläche mit Erfolg durchzuführen, um so mehr, als sich dadurch die Möglichkeit ergibt, bei stillstehendem Motor eine gewisse Fallschirmwirkung herbeizuführen.

Einwirkung auf das Luftfahrzeug. Der Propellerkraft kommt eine gewisse Bedeutung auf die Stabilität und die Steuerung des Flugzeugs zu; zunächst ist stets die Drehmomentreaktion zu berücksichtigen, die der Propeller auf den Apparat ausübt.

Alle folgenden Punkte treffen auch in verringertem Maße auf das Luftschiff zu.

Solange es sich um stets denselben Vortrieb, also auch um die gleiche Größe der Reaktion handelt, läßt sich diese am einfachsten durch ein Ausgleichgewicht auf der anderen Flügelseite kompensieren, dieses Gewicht ist jedoch beim Gleitflug mit abgestelltem Motor zu beachten; sollen verschiedene Leistungen des Motors zugelassen werden, so gleicht man die verschieden große Reaktion am besten durch die Steuerung oder durch verschiebbare Schwerpunktsverlegung aus. Ferner ist die Kreiselwirkung des Einzelpropellers zu beachten; je größer sein Trägheitsmoment, desto stärker wird die Präzession, auf Ruderlage des Seitensteuers erhält der Apparat durch die Kreiselwirkung des Propellers eine Neigung in der Flugrichtung, die durch Legen des Höhensteuers ausgeglichen werden muß. Bei Verwendung zweier im entgegengesetzten Sinne umlaufenden Propeller kann ein Ausgleich der Reaktionsmomente unter allen Umständen erreicht werden, jedoch müssen die Uebertragungsmittel und die Luftschrauben selbst sehr sorgfältig ausgeführt werden, damit sie sowohl in bezug auf Umlaufgeschwindigkeit als auch der aufgenommenen Energiemengen vollkommen übereinstimmen. Sind die beiden parallel gerichteten, starr gelagerten Propeller von gleichem Trägheitsmoment so auf die Wellen gekeilt, daß sich in jeder beliebigen Lage symmetrische Flügelstellung ergibt, so kann sich die Präzession nur auf eine Formänderung der Lagerung erstrecken, was durch geeignete Versteifung zu vermeiden ist.

Mit Rücksicht auf die Kreiselwirkung benutzt Reißner die Luftschrauben, um ein stabilisierendes Drehmoment zu erzeugen; der Propeller ist mit der Motorwelle durch ein kurzes Universalgelenk verbunden und wird daher im Betrieb seine Achse stets in die Achse des größten Trägheitsmomentes und des Drehmomentes einstellen; erleidet das Flugzeug irgendeine Neigung der Längsachse, so wird die Propellerebene infolge der Kreiselwirkung erst eine Zeitlang erhalten bleiben und langsam und aperiodisch in die neue Lage senkrecht zur Motorwelle folgen. Handelt es sich um ungewollte Winkelneigungen des Apparates, so wird das durch den Propeller hervorgerufene drehende Moment das Flugzeug wieder aufzurichten suchen.

2c) Navigation. Nachdem wir so die Einzelorgane zum Vortrieb und zur Lenkung kennen gelernt haben, soll kurz auf ihre einzelnen Funktionen bei größeren Ueberlandfahrten eingegangen werden, wobei jedoch wegen der Höhennavigation auf 27 verwiesen wird. Die Aufgabe der Seitennavigation besteht darin, das Ziel auf dem horizontal jeweils kürzesten Weg zu erreichen. Soweit dieses Ziel sich ebenso wie das Schiff in der Luft befindet (etwa ein anderes Fahrzeug) kommt für diese Erreichung lediglich die Eigengeschwindigkeit in Betracht, sofern aber zwischen Ziel und der Erde irgendeine feste Verbindung besteht, müssen die jeweiligen Luftströmungen in Rechnung gezogen werden.

Für die Erreichung des Zieles gibt es zwei Möglichkeiten; einmal wird die Spitze des Schiffes von Anfang an auf das Ziel gerichtet und dann während der ganzen Fahrt auf dasselbe gehalten; infolge der Luftdrift erhält das Schiff eine immer andere Richtung und erreicht das Ziel schließlich von einer ganz anderen Seite (Kurvenfahren); dann kann aber auch bei genauer Kenntnis der Eigengeschwindigkeit, des Kreuzungswinkels von Ziellinie und Wind sowie der Windstärke die Längsachse des Schiffes gleich so gestellt werden, daß es das Ziel zwar mit schräg gestellter Achse, aber auf dem geraden und kürzesten Wege erreicht (Zielfahren).

Bei Zielfahrten nach einem Ort und von dort zum Ausgangspunkt zurück ist stets

zu beachten, daß die geringste Luftdrift die Gesamtfahrzeit gegen eine Fahrt bei Windstille verlängert; soll keine Zwischenlandung zur Ergänzung der Ballast- und Betriebsvorräte gestattet sein, so hängt die größtmögliche Entfernung vom Aktionsradius und der herrschenden Luftdrift ab. Für die Höhensteuerung sind dieselben Instrumente gebräuchlich wie beim Freiballon, nämlich Barograph und Barometer; für die Seitensteuerung werden dagegen Navigationskompaß und Fahrtdreieck verwendet. Ersterer ist ein gewöhnlicher Schiffskompaß mit Peilvorrichtung; Steuerstrich und Mittelpunkt (Hütchen) der Nadel stehen genau auf Mittelachse Schiff, so daß bei einem Zielfahren nur nötig ist, das Schiff in die gewünschte Schräglage zum Ziel zu bringen, das Ruder wieder mitschiffs zu legen und nun die Nadel im richtigen Abstand vom Steuerstrich zu halten. Das genügt aber nur bei einigermaßen konstantem Wind; ist derselbe dagegen Aenderungen unterworfen, so würde dies sich durch eine Abdrift des Fahrzeugs bemerkbar machen. Ein neuer durchsichtiger Kompaß von Daloz vermeidet dies durch parallele Linien auf einer Glimmerscheibe, die beim Start einmal genau in die richtige Kurslinie eingestellt werden müssen, dann aber auch stets ein genaues Zielfahren ermöglichen.

Das Fahrtdreieck soll Navigationsaufgaben schnell mit hinreichender Genauigkeit lösen, indem es von den beiden Winkeln der Luftdrift und der notwendigen Eigenrichtung des Schiffes, sowie von der Windstärke, der Eigengeschwindigkeit und der Fahrgeschwindigkeit über der Erde aus einigen bekannten die übrigen ermittelt; hierdurch wird es dem Führer möglich, durch Beobachtungen seine Steuerrichtung zu kontrollieren und zu berichtigen. Während die beweglichen Steuereinrichtungen den Zweck verfolgen, einen bestimmten Kurs zu setzen, dienen die Stabilisierungsflächen dazu, die einmal eingeschlagene Richtung des Schiffes zu halten; um das Steuern nun nicht unnötig zu erschweren, dürfen sie nicht zu groß bemessen werden, da sonst der Fall eintreten kann, daß das Schiff überhaupt nicht zu steuern ist.

Bei festgesetztem Steuer beginnt das Schiff nach kurzer Fahrt (etwa nach einer Wendung von 90°) einen vollständigen Kreis zu fahren, was praktisch dazu benutzt wird, die Windstärke und Richtung zu messen. Bestimmt man nämlich den Ort, bei welchem der Kreis mit Sicherheit begonnen ist, so ergibt sich aus der Zeit, bis das Schiff wieder in derselben Lage angekommen ist, und dem zurückgelegten Weg die Lufttrift, die ja zum richtigen Kurssetzen bekannt sein muß.

Im allgemeinen müssen wegen des geringen Seitenwiderstandes des Schiffes in der Luft die Steuerbewegungen als kurze Ruderschläge ausgeführt werden, da sonst eine kontinuierliche Bewegung nach der dem Ausschlag gegenüberliegenden Seite eingeleitet wird.

Literatur. ***Drzewiecki.*** *Des Hélices aériennes.* — ***Eberhardt,*** *Theorie und Berechnung der Luftschrauben.* — ***Emden,*** *Grundlagen der Ballonführung.* — ***Finsterwalder,*** *Aerodynamik, Bd. IV, 17 der Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften.* — ***Güldner,*** *Entwerfen und Berechnung der Verbrennungsmotoren.* — ***Lanchester,*** *Aerodynamik, 1. und 2. Teil. Uebersetzt von C. und A. Runge.* — ***Lilienthal,*** *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst.* ***Marey,*** *Le vol des oiseaux.* — ***Moedebeck's*** *Taschenbuch für Flugtechniker und Luftschiffer. Hrsg. von R. Süring.* — ***Nimführ,*** *Leitfaden der Luftschiffahrt und Flugtechnik, 2. Aufl.* — ***Painléve und Borel,*** *Theorie und Praxis der Flugtechnik. Uebersetzt von Schöning.* — ***Rumpler,*** *Die Flugmaschine.* — ***Derselbe,*** *Motoren für Luftfahrzeuge.* — ***Vorreiter,*** *Motoren für Luftschiffe.* — *Außerdem viele Aufsätze in den Zeitschriften: Der Motorwagen; Zeitschr. f. Flugtechnik u. Motorluftschiffahrt; Flugsport; Zeitschrift d. Vereins deutsch. Ing.; Engineering; L'aérophile; La technique aéronautique; Flight.*

P. Béjeuhr

Luftpumpen.

1. Vakuumpumpen: a) Luftpumpe beruhend auf dem Guerickeschen Kolbenprinzip: α) Luftpumpe Guerickes und historisch bedeutungsvolle Versuche. β) Nasse und trockene Luftpumpen. Ventilsteuerung. Schädlicher Raum. γ) „Geryk"-Luftpumpe. δ) Kapselluftpumpe von Siemens-Schuckert und von Gaede. ε) Töplers Quecksilber-Luftpumpe. ζ) Schaukel-Luftpumpe von Reden. η) Sprengels Quecksilberluftpumpe. ϑ) Wasserstrahlluftpumpe. ι) Gaedes rotierende Quecksilberluftpumpe. ϰ) Die höchsten, mit Quecksilberluftpumpen erreichten Verdünnungen und ihre Bedeutung. b) Das Reibungsprinzip: α) Gaedes Reibungsluftpumpe oder Molekularluftpumpe. β) Wirkungsweise der Molekularluftpumpe. 2. Kompressionsluftpumpe und ihre Anwendung. 3. Gebläse: Blasebalg. Wassertrommelgebläse. Root's Gebläse. Zentrifugalgebläse.

1. Vakuumpumpen. 1a) Luftpumpen beruhend auf dem Guerickeschen Kolbenprinzip. α) Luftpumpe Guerickes und historisch bedeutungsvolle Versuche. Otto v. Guericke war der erste, der auf den Gedanken kam, aus einem geschlossenen Gefäß mittels einer Pumpe die Luft zu entfernen. Er verband eine Feuerspritze mit einer kupfernen Kugel (Fig. 1). Bei den ersten Versuchen füllte er die Kugel mit Wasser. Nachdem er einige Zeit gepumpt hatte, wurde dieselbe mit einem lauten Knall nach innen zerdrückt. Die Ursache schiebt Otto v. Gue-



ricke mit Recht auf flache Stellen an der Kugel, welche die Widerstandsfähigkeit gegen den atmosphärischen Ueberdruck verringern. Er fand später, daß die auszupumpende Kugel nicht vorher mit Wasser gefüllt zu sein brauchte, sondern daß die Pumpe trotz der entstehenden Luftverdünnung imstande war, die Luft selbst aus dem Gefäß herauszusaugen. Damit war die Luftpumpe erfunden.

Die Wirkungsweise der Luftpumpe ist im allgemeinen die gleiche wie die der Wasserpumpe. Die Erfindung dieser wird Ctesibius (150 v. Chr.) zugeschrieben und ist im Prinzip durch Figur 2 gekennzeichnet. In dem Zylinder A, dem „Stiefel", kann mittels der Kolbenstange B der Kolben C auf- und abwärts bewegt werden. An dem Boden des Stiefels münden die Röhren D und E ein. Die Klappen F und G bewirken, daß das Wasser durch D nur zuströmen, durch E nur abströmen kann. Bei der Verwendung als Luftpumpe wird D mit dem auszupumpenden Raume, dem „Rezipienten" verbunden. Bei der Aufwärtsbewegung des Kolbens

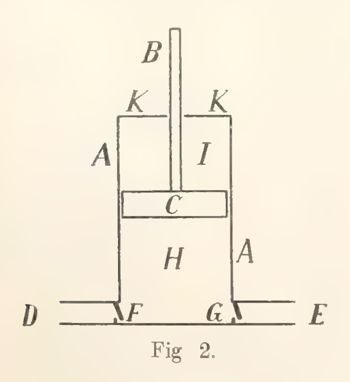


Fig 2.

strömt die Luft aus dem Rezipienten in den Raum H, bei der Abwärtsbewegung wird der Luftinhalt bei H durch G an die Atmosphäre abgegeben.

Die Erfindung Otto v. Guerickes erregte unter seinen Zeitgenossen großes Aufsehen, besonders durch den Versuch mit den „Magdeburger Halbkugeln". Er zeigte den auf dem Reichstage in Regensburg versammelten Fürsten, daß zwei Halbkugeln, die man aufeinander legte und evakuierte, durch den äußeren Luftdruck so stark aufeinander gepreßt wurden, daß 16 Pferde nicht imstande waren, dieselben auseinander zu reißen. Wurde durch einen Hahn Luft eingelassen, so fielen die Halbkugeln von selbst auseinander.

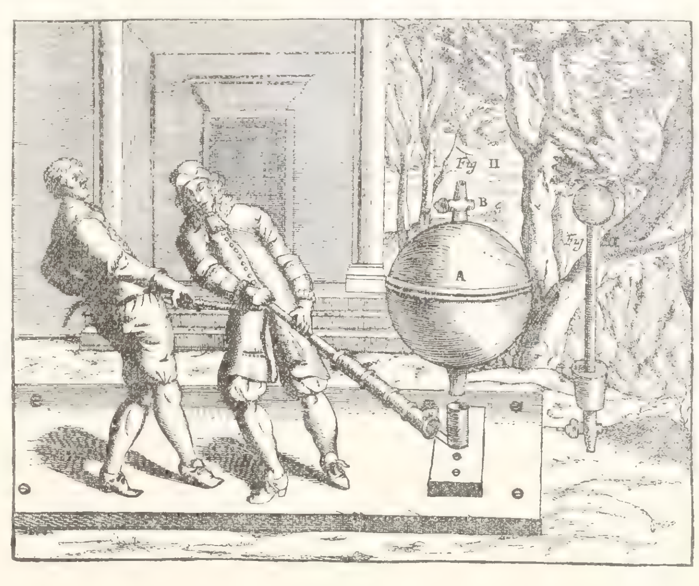


Fig. 1.

Auf jeden Quadratzentimeter übt die atmosphärische Luft einen Druck von einem Kilogramm aus.

Huygens und Papin führten zur Erleichterung der Versuche mit der Luftpumpe den Luftpumpenteller ein. In Figur 3 ist A der Teller, auf dem die unten offene Glasglocke B mit ihrem unteren Rand genau passend aufsitzt. Durch eine Bohrung des Tellers führt das Rohr C zur Luftpumpe. Mit der Luftpumpenglocke wurde eine große Zahl von Versuchen ausgeführt: Unter der Luftpumpenglocke sinkt ein Quecksilberbarometer bis auf einen kleinen Wert; eine zum Teil mit Luft gefüllte tierische Blase bläht sich straff und wird schließlich zersprengt; eine Wage mit hohler Glaskugel, ein „Dasymeter", gibt im Vakuum einen Ausschlag, was darauf zurückzuführen ist, daß im Vakuum der Auftrieb durch die Luft fortfällt; eine Klingel hört im Vakuum auf zu tönen.

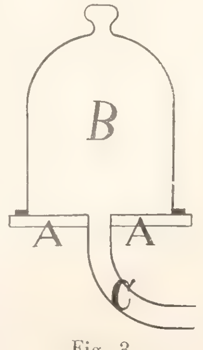


Fig. 3.

Otto v. Guericke hatte, um eine möglichst vollkommene Abdichtung gegen die atmosphärische Luft zu erreichen, Kolben, Hähne, Ventile und Rohrverbindungen mit Wasser überdeckt. Infolge der Anwesenheit

von Wasser konnte man mit einer solchen Pumpe kein höheres Vakuum erreichen, als die Spannkraft des Wasserdampfes bei Zimmertemperatur beträgt, d. i. 10 bis 20 mm. Erst später, als die Mechanik weiter vorgeschritten war, wurde es möglich, unter Vermeidung der Flüssigkeitsdichtung „trockene Luftpumpen" zu bauen. Nasse Luftpumpen, welche Luft und Wasser gleichzeitig pumpen, werden bei den Kondensationsanlagen von Niederdruckdampfmaschinen viel verwendet.

β) Nasse und trockene Luftpumpen. Ventilsteuerung. Schädlicher Raum. Die Ventilklappen der Stiefelpumpe (Fig. 2) haben den Vorteil, daß der Abschluß der Röhren D und E automatisch erfolgt, andererseits aber den prinzipiellen Nachteil, daß bei dem Ansaugen die Luft in dem Rezipienten einen gewissen Ueberdruck haben muß, damit das Ventil F geöffnet werden kann. Bei einfachen Luftpumpen hat man deshalb die Ventile durch einen Hahn mit mehreren Bohrungen ersetzt, der jedesmal beim Auf- und Abwärtsbewegen des Kolbens von Hand umgestellt werden muß. Man hat auch die Ventile mit Stangen versehen, so daß dieselben zwangsläufig durch die Bewegung des Kolbens gesteuert werden.

Eine Grenze für die mit einer trockenen Stiefelpumpe (Fig. 2) erzielbare Luftverdünnung ist durch den sogenannten „schädlichen Raum" gegeben. Befindet sich der Kolben in der tiefsten Stellung, so ist es nicht möglich, die Pumpe so genau zu bearbeiten, daß alle Luft aus dem zwischen Kolben, Stiefel und den Ventilen befindlichen Raum verdrängt wird. Der im schädlichen Raum zurückbleibende Luftrest verteilt sich wieder beim Hochziehen des Kolbens im Vakuum. Der einfachste Kunstgriff, die Wirkung des schädlichen Raumes zu vermindern, besteht darin, daß man zwei Stiefelpumpen derart miteinander verbindet, daß die in der ersten Pumpe ausgestoßene Luft in der zweiten angesogen wird. Dadurch wird die Luft aus dem schädlichen Raum der ersten Pumpe abgesogen und man erhält höhere Vakua. Bei großen Vakuumpumpen wird nach dem System Burckhardt und Weiß derselbe Zweck erreicht, ohne daß eine zweite Pumpe notwendig ist. Diese Pumpen sind so eingerichtet, daß der zwischen dem Kolben C und dem Deckel K befindliche Raum J (Fig. 2) ebenso wie der untere Raum H die Luft aus dem Rezipienten ansaugt. Die Pumpe ist somit doppelt wirkend. Statt Ventile hat die Pumpe einen Schieberkasten mit zwei Schiebern, ähnlich wie bei Dampfmaschinen. Die Schieber stellen der Reihe nach solche Verbindungen her, daß z. B. bei der obersten Stellung des Kolbens C der Raum H zuerst die Luft aus dem Rezipienten und dann die Luft aus dem schädlichen Raum bei J aufnimmt. Dann bewegt sich C abwärts, die Luft in H wird an die Atmosphäre abgegeben und die Räume J und H vertauschen ihre Rollen, indem bei der untersten Kolbenstellung die Luft im schädlichen Raum bei H vom Raum J aufgenommen wird.

γ) „Geryk"-Luftpumpe. Die nasse Luftpumpe von Otto v. Guericke kam wieder zu Ehren, als nach dem Vorgang von Robert Gill das Wasser durch Oel ersetzt und der schädliche Raum durch Oel ausgefüllt wurde. Der Vorteil besteht darin, daß die Dampfspannung des Oeles etwa 1000 mal kleiner ist als die des Wassers. Eine zweckmäßige Konstruktion einer Oelluftpumpe hat Fleuß angegeben und von der Pulsometer Co. in Reading unter dem Reklamenamen „Geryk-Pump" fabrizieren lassen. Der Kolben J ist mit Oel bedeckt und drängt bei der Aufwärtsbewegung die Luft durch das Ventil G (Fig. 4). Bei der Abwärtsbewegung des Kolbens entsteht über dem Oel des Kolbens ein Vakuum, in welches die Luft aus dem bei A angeschlossenen Rezipienten einströmt; anfänglich durch das Ventil E und später, wenn die Luftverdünnung schon weiter vorgeschritten ist, durch die untere Oeffnung in der Kammer B.

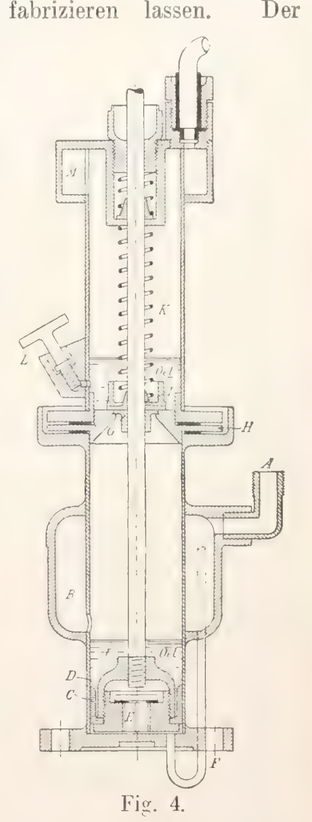


Fig. 4.

δ) Kapselluftpumpe von Siemens-Schuckert und von Gaede. Den schädlichen Raum haben Siemens-Schuckert und Gaede vermieden, indem sie den sogenannten Wasserriegel des Prinzen Rupprecht von der Pfalz (1609 bis 1682) als Luftpumpe ausbildeten. Der sich drehende, zylindrische Körper A (Fig. 5) ist exzentrisch in der Kapsel G gelagert, so daß zwischen beiden ein sichelförmiger Raum frei bleibt. Die Schieber S gleiten in dem Schlitz des Körpers A und unterteilen den sichelförmigen Raum

zwischen A und G, so daß bei der Rotation von A in der Pfeilrichtung die in den sichelförmigen Räumen enthaltene Luft durch die als Kolben wirkenden Schieber von der Saugdrüse C nach dem Ausströmungskanal D gefördert wird. Derartige Kapselpumpen lassen sich nicht entfernt so exakt anfertigen, wie Kolbenpumpen. Um die unvermeidlichen Undichtigkeiten unschädlich zu machen,

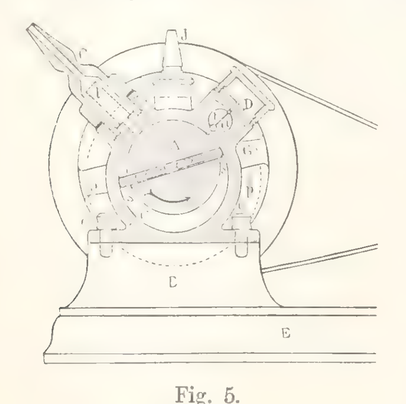


Fig. 5.

haben Siemens und Halske (Oberingenieur Hoffmann) das ganze Kapselwerk unter Oel gesetzt, so daß auch die Ausströmungsöffnung sich unter Oel befindet. Da das Oel manche Unzuträglichkeiten mit sich bringt, z. B. beim Abstellen der Pumpe sehr leicht in den Rezipienten eindringt, hat Gaede die Undichtigkeiten dadurch unschädlich gemacht, daß er genau am Ende des sichelförmigen Raumes bei a ein schlitzförmiges Ventil anbrachte. Die zwischen Schieber und Ventil befindliche Luft wird bei jeder halben Umdrehung fast vollständig nach außen verdrängt, so daß der sichelförmige Raum gut evakuiert bleibt, und der Rezipient durch die Schieber nicht gegen die Atmosphäre, sondern nur gegen ein relativ hohes Vorvakuum abgesperrt wird. Ein besonderer Vorteil dieser Gaedeschen Pumpe, welche von der Firma E. Leybolds Nachfolger in Köln hergestellt wird, besteht in der ziemlich weitgehenden Unempfindlichkeit gegen Wasserdämpfe. Die sich in der Pumpe bildenden Wassertröpfchen fließen von t auf den Boden des an der Pumpe angebrachten Oelreservoirs und werden dadurch unschädlich. Dies kommt vor allem im Gebrauch bei Vorlesungsversuchen zur Geltung, indem man z. B. zeigen kann, daß das Wasser im Vakuum bei Zimmertemperatur siedet und infolge der großen Verdunstungskälte gefriert, besonders wenn durch Gegenwart von Schwefelsäure im Vakuum die Verdunstung beschleunigt wird.

Bei den übrigen, beschriebenen Kolbenluftpumpen, besonders den Oelluftpumpen, sind die Wasserdämpfe sehr störend, weil dieselben bei dem Druckhub des Kolbens kondensieren, und das Wasser bei dem Saughub des Kolbens wieder verdampft. Man ist daher gezwungen, die Oelluftpumpen vor Wasserdämpfen zu schützen, indem man in der Vakuumleitung ein mit Phosphorpentoxyd gefülltes Gefäß anbringt, welches die Wasserdämpfe absorbiert.

ε) Töplers Quecksilberluftpumpe. Bei den Quecksilberluftpumpen wird die Luft durch Quecksilber verdrängt. Der schädliche Raum läßt sich bei diesen vollständig vermeiden. Die erste Quecksilberluftpumpe wurde von dem schwedischen Gelehrten und Philosophen Emanuel v. Swedenborg konstruiert (1722). Ein mit Ventilen versehenes Gefäß wurde abwechselnd mit Quecksilber gefüllt und wieder entleert, so daß die Quecksilberoberfläche wie der Kolben C in der Stiefelpumpe Fig. 2 wirkte. Nach dem gleichen Prinzip hat später Geißler in Bonn eine Pumpe konstruiert und mit derselben die elektrische Entladung in luftverdünnten Röhren (Geißlerröhren) untersucht. Töpler hat die Hähne und Ventile der alten Quecksilberluftpumpen durch automatisch wirkende Quecksilberabschlüsse ersetzt. Wie Figur 6 zeigt, ist das Gefäß A der Töplerpumpe durch einen Schlauch mit dem Glasgefäß B verbunden und mit Quecksilber gefüllt. Wird A in die Höhe gehoben, so füllt das Quecksilber die Kugel B. Die daselbst befindliche Luft wird durch das Glasrohr C hindurch nach außen verdrängt und kann unter der Glocke D aufgefangen werden. Senkt man das Gefäß A, so fließt das Quecksilber aus B zurück und die Luft tritt aus dem zu vakuierenden Rezipienten R durch das Rohr F bei E nach B ein. Durch Anheben von A beginnt das Spiel von neuem. Die Pumpe erhielt verschiedene Verbesserungen durch Bessel-Hagen, Neesen, Raps. Wenn auch diese Pumpe jetzt fast überall durch andere Pumpen verdrängt ist, so verleiht ihr der Umstand, daß man die abgepumpten Gase bei D unter Atmosphärendruck aufsammeln kann, für gasanalytische Untersuchungen einen bleibenden Wert.

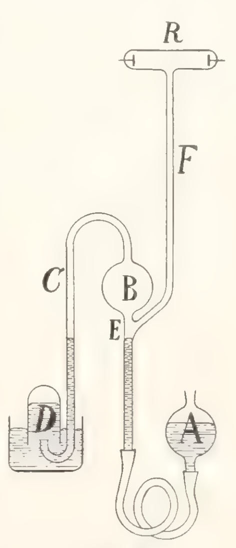


Fig. 6.

ζ) Schaukelluftpumpe von U. v.

Reden. Wird das Gefäß A in Fig. 6 ebenso eingerichtet wie die Kugel B, so wird die Pumpe doppelt wirkend und man erhält nach Wood eine bequeme Anordnung, wenn beide Kugeln auf einem gemeinsamen, um einen Zapfen drehbaren Brett montiert werden. Durch Schaukelbewegung des Brettes wird abwechselnd A und B mit Quecksilber gefüllt.

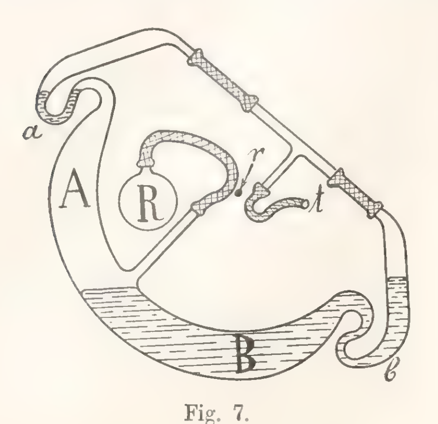


Fig. 7.

U. v. Reden hat die Schaukelpumpe verbessert, indem er die Gefäße A und B und deren Verbindungsrohr als Teile eines einzigen Rohres anordnet, wie Figur 7 zeigt. Das Rohr AB hat an beiden Enden S-förmige Ansätze a und b. R ist der Rezipient, bei t wird eine Vorpumpe, z. B. Stiefelpumpe angeschlossen. Das Gas des Rezipienten füllt den Raum A und wird, wenn die Pumpe um den Zapfen r nach der anderen Seite schaukelt, von dem Quecksilber aus A durch a nach t gedrängt. Der Teil B des Rohres füllt sich mit der Luft des Rezipienten und der gleiche Vorgang wiederholt sich bei jeder Schaukelbewegung. Die Verbindung von Rezipient und Schaukelpumpe muß beweglich sein. Da eine Gummischlauchverbindung zur Erzeugung sehr hoher Vakua nicht geeignet ist, hat Reden die Verbindung durch einen „Kugelschliff" hergestellt: Das eine Rohr endigt in einer Kugelschale, das andere Rohr in einem runden, durchbohrten Kopf. Beide Teile sind passend aufeinander geschliffen und werden mittels eines zähen Fettes gedichtet.

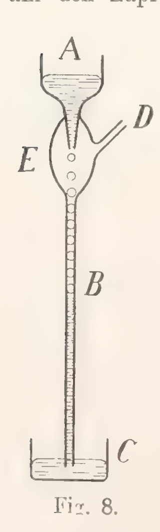


Fig. 8.

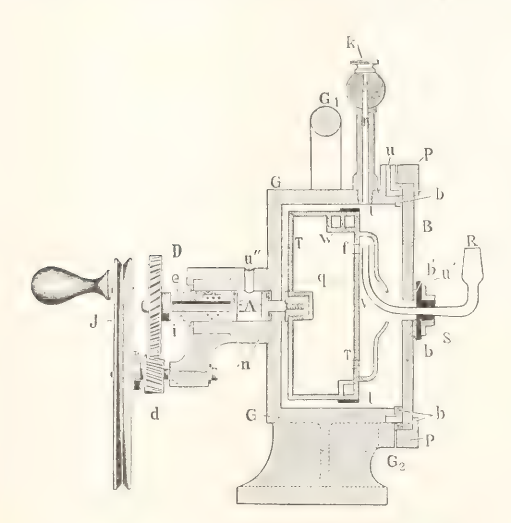
η) Sprengels Quecksilberluftpumpe Bei der Sprengelschen Quecksilberluftpumpe tropft Quecksilber aus den Ansatzröhrchen bei A (Fig. 8) in die Glasröhre B, das sogenannte Fallrohr. Die fallenden Tropfen wirken wie kleine Kolben, schließen in dem Rohr kleine Luftmengen ab, und führen diese in Form von Luftbläschen abwärts nach dem Gefäß C, woselbst die Luft entweicht. Dadurch entsteht in dem Raum E eine Luftverdünnung. Der Rezipient wird an dem Ansatzrohr D angeschlossen. Die Pumpe wurde verbessert von Gimingham, Kahlbaum und vor allem mit Einrichtungen versehen, welche automatisch das Quecksilber wieder von C nach A heben. Die Glasteile dieser Pumpe sind durch „Quecksilberschliffe" miteinander verbunden. Die beiden zu verbindenen Rohrenden sind konisch geformt, durch Schleifen aufeinander gepaßt und werden zum Abschluß gegen die Luft mit Quecksilber überdeckt. Infolge der hohen Kapillardepression dringt das Quecksilber nicht durch die Schleifflächen. Damit die Luft nicht zwischen Quecksilber und Glas entlang kriecht und in das Vakuum eindringt, müssen Glas und Quecksilber gut gereinigt, vor allem fettfrei sein.

ϑ) Wasserstrahlluftpumpe. Wird die Sprengelsche Quecksilberluftpumpe statt mit Quecksilber mit Wasser betrieben, indem man die Pumpe bei A an die Wasserleitung anschraubt, so erhält man die Bunsensche Wasserstrahlluftpumpe. Außer durch ihre sehr kompendiöse Form zeichnet sich die vollständig aus Glas hergestellte Wasserstrahlpumpe durch ihre geringen Anschaffungskosten und die Unempfindlichkeit gegen ätzende Dämpfe aus. Diesen Umständen verdankt dieselbe ihre große Verbreitung in den Laboratorien. Der Druck läßt sich mit dieser Pumpe natürlich nicht weiter herabsetzen, als bis zur Spannkraft des Wasserdampfes, welche je nach der Temperatur des Wassers 10 bis 20 mm Quecksilbersäule beträgt.

ι) Gaedes rotierende Quecksilberluftpumpe. Die rotierenden Quecksilberluftpumpen haben das Gemeinsame, daß komplizierte Röhren und Kammersysteme bei der Rotation um eine horizontale oder schräge Achse sich in den jeweils unten befindlichen Teilen mit Quecksilber, in den jeweils oben befindlichen Teilen mit Luft anfüllen. Die Oberfläche des als Kolben wirkenden Quecksilbers verdrängt die abgeschlossene Luft und läßt dadurch eine Saugwirkung zustande kommen. Bei der einen Klasse von rotierenden Luftpumpen dient das rotierende Röhrensystem als Gefäß für das Quecksilber. Pumpen dieser Art, bei denen kreisförmig gebogene Röhren um eine geneigte Achse rotieren, sind von Schulze-Berge, F. Florio, Kauffmann konstruiert. Bei der anderen Klasse rotieren-

der Quecksilberluftpumpen rotiert ein Kammersystem in einem Quecksilberbad. Pumpen dieser Art sind von Fritsche und Pichon, Barr und Stroud, Pintsch, Gaede, Pfeiffer, Kohl konstruiert worden. Die größte Verbreitung sowohl in wissenschaftlichen Laboratorien wie in technischen Betrieben hat unter diesen

Gasdruck in dem Gehäuse so niedrig halten, daß die zentrale Oeffnung der Trommel bei V von Quecksilber überdeckt bleibt. Solange der Druck noch größer ist, kann die Quecksilberluftpumpe nicht wirken und der Rezipient muß direckt mit der Vorpumpe kommunizieren. Um dies zu ermöglichen, hat Gaede die Glasapparatur Figur 10 kon-



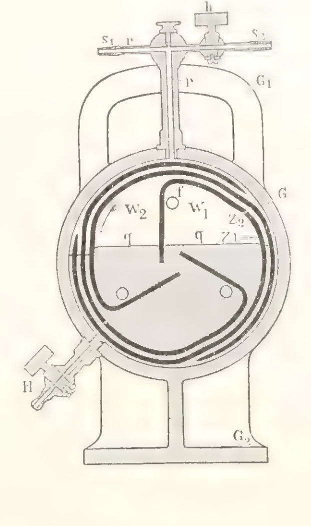


Fig. 9.

rotierenden Quecksilberluftpumpen infolge der erreichbaren sehr hohen Verdünnungen, der raschen Wirkungsweise und einfachen Handhabung die Gaedepumpe gefunden, welche von der Firma E. Leybolds Nachfolger in Köln hergestellt wird.

Die Gaedesche Quecksilberluftpumpe (Fig. 9) besteht aus einem gußeisernen Gehäuse G, welches bis q mit Quecksilber gefüllt und vorne durch die Glasplatte B verschlossen ist. In dem Quecksilberbad rotiert die auf der Welle A sitzende Trommel T. Durch die Zwischenwände Z ist die Trommel in Kammern unterteilt, welche über dem Quecksilber die Räume W_1 und W_2 abschließen. Bei der Rotation in der Pfeilrichtung vergrößert sich der Raum W_1 und saugt durch die Oeffnung f das Gas aus der Vorkammer V und durch das Rohr R aus dem daran angeschlossenen Rezipienten an. Bei fortgesetzter Rotation taucht die Oeffnung f unter den Quecksilberspiegel wie bei W_2, wodurch der Gasinhalt vom Rezipienten abgeschlossen wird. Der Gasinhalt wird dann durch das nachströmende Quecksilber an die Peripherie zwischen die Wände Z_1 und Z_2 gedrängt und schließlich aus den Gängen heraus in das Gehäuse gefördert. Von da wird das Gas durch die an r angeschlossene Vorpumpe abgesogen. Die Vorpumpe z. B. Wasserstrahlpumpe, muß den

struiert. Rezipient und Vorpumpe sind auf dem Wege EFO as_1 s_2 miteinander verbunden. Das U-Rohr M ist rechts vollständig, links bis unter die Oeffnung O mit Queck-

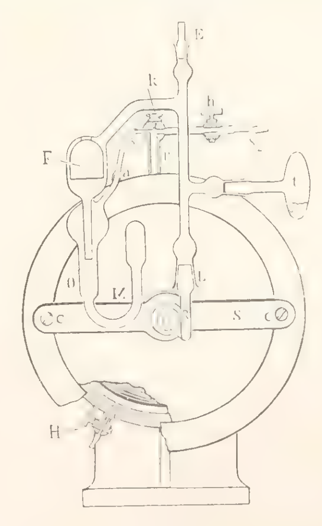


Fig. 10.

silber gefüllt. Ist ein bestimmtes Vorvakuum erreicht, so sinkt das Quecksilber im rechten Schenkel und steigt im linken Schenkel von

M und verschließt die Oeffnung O. Dadurch ist der Rezipient von der Vorpumpe abgeschlossen. Dann beginnt man die Pumpe zu drehen. Das Gefäß t enthält Phosphorpentoxyd zur Absorption der Wasserdämpfe. Zur Verbindung der Röhren mit dem Rezipienten sind die Rohrenden alle unter gleichem Winkel konisch geschliffen. Die genau aufeinander passenden Schliffflächen dieser „Normalschliffe“ werden mit einem aus Gummi und Vaseline bestehenden Fett abgedichtet.

ϰ) Die höchsten, mit Quecksilberluftpumpen erreichten Verdünnungen und ihre Bedeutung. Die höchsten Vakua, die bei Quecksilberluftpumpen im günstigsten Falle erreicht wurden, betragen bei Anwendung einer Töplerpumpe 0,000009 mm nach einer Messung von Bessel-Hagen, bei einer Sprengelpumpe 0,000007 mm nach einer Messung von Odgen N. Rood, und bei einer Gaedepumpe mit einer Kapselpumpe als Vorpumpe 0,000001 mm nach einer Messung von Gaede. Gegen die Angabe so niederer Drucke wurde wiederholt eingewandt, daß diese Drucke nur Partialdrucke der Luft bedeuten, weil dieselben mit einem Mac Leod (vgl. den Artikel „Manometer“) bestimmt wurden, und daß die tatsächliche Verdünnung nur bis 0,001 mm, d. i. bis zur Quecksilberdampfspannung herabgesetzt werden kann. Zur Klärung dieser Frage betrachten

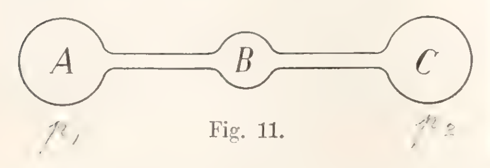


Fig. 11.

wir die Gleichgewichte zwischen den Total- und Partialdrucken in den drei Gefäßen ABC (Fig. 11), welche durch Röhren verbunden sind. A enthalte etwas Quecksilber, und B enthalte ein Absorptionsmittel (Kondensationsvorlage) für Quecksilberdämpfe, so daß die Spannkraft der Quecksilberdämpfe in C praktisch gleich O ist. Steht die Luft in C unter Atmosphärendruck und erhitzt man A, so siedet das Quecksilber in A und der Quecksilberdampf verdrängt die Luft aus A nach B und C, bis der Quecksilberdampfdruck in A ebenso groß ist wie der Luftdruck in C. Nach dieser Methode bestimmt man Siedepunkte. Nicht die Partialdrucke, sondern die Totaldrucke halten sich das Gleichgewicht. Das gleiche gilt auch bei stark vermindertem Druck. Erstreckt sich die Gültigkeit dieses Erfahrungssatzes bis in das höchste Vakuum, dann sind allerdings die obigen Angaben über die von Quecksilberluftpumpen erzeugten hohen Vakua illusorisch, und man kann keine Drucke kleiner als die Quecksilberdampfspannung 0,001 mm erzeugen. Gaede hat nun gezeigt, daß im höchsten Vakuum die Totaldrucke nicht mehr in Gleichgewicht stehen. Hat das Quecksilber in A Zimmertemperatur (17°) und sind ABC hoch evakuiert, so besteht nach Gaede für die Partialdrucke der Luft p_1 in A und p_2 in C die Beziehung:

$$p_2 = p_1 (1 + 0{,}13 . r)$$

wenn r der Radius der Röhre ist, die A mit B verbindet. Für r = 0,4 cm ist somit p_2 um 5% größer als p_1. Der Unterschied rührt daher, daß die Quecksilberdämpfe bei der Strömung von A nach B die Luft infolge des Diffusionswiderstandes in einem gewissen Grade von A nach B zurückdrängen. A bedeute nun eine Quecksilberluftpumpe (oder Mac-Leod), B eine Absorptionsvorlage für die Quecksilberdämpfe und C den Rezipienten. In der Pumpe sei der Partialdruck der Luft $p_1 = 0{,}000001$ mm. Der Totaldruck P_1 in der Pumpe ist dann gleich dem Partialdruck p_1 der Luft vermehrt um den Quecksilberdampfdruck 0,001 mm, somit ist $P_1 = 0{,}001001$ mm. Der Totaldruck P_2 in C ist gleich dem Partialdruck p_2. Es ist $p_2 = 1{,}05 . P_1$, somit ist $P_2 = 0{,}00000105$ mm. Der Totaldruck in der Pumpe A ist demnach fast 1000 mal größer als der Totaldruck im Rezipienten C. Die Angaben über die extrem hohen Vakua in Quecksilberpumpen bestehen daher zurecht.

Die günstigen Resultate, welche mit Quecksilberluftpumpen erzielt worden sind, müssen auf folgendes zurückgeführt werden. Die Dampfspannung des Quecksilbers ist an sich sehr klein und die Diffusionsverhältnisse, wie beschrieben, sind außerordentlich günstig, die Gase werden von Quecksilber bei Zimmertemperatur nicht absorbiert und schließlich bilden die Quecksilberdämpfe keine Flüssigkeitshäute auf der Glaswand. Mit Oelluftpumpen läßt sich angeblich der Partialdruck der Luft bis auf 0,0002 mm herabsetzen. Für wissenschaftliche Zwecke bedeutet dies wegen der unreinen Versuchsbedingungen keinen nennenswerten Vorteil, indem im Vakuum Oeldämpfe auf die Glaswände niederschlagen (ev. mit dem Alkali der Glaswand verseifen) und z. B. durch elektrische Vakuumentladungen zersetzt werden.

Bei wissenschaftlichen Untersuchungen mit Luftpumpen ist der Querschnitt der Verbindungsröhren mehr zu beachten, als wie auf den ersten Blick nötig scheint. Es ist $W = \Sigma \frac{l}{r^3}$ der Widerstand der Rohrleitung für Luft im hohen Vakuum, wenn r der Radius in mm und l die Länge des Rohrstückes in Meter ist. Für l = 1 Meter, r = 3 mm ist z. B. $W = \frac{1}{27}$. Es ist $\frac{1}{W}$

= 27 cbcm per sec die Leitungsfähigkeit des Rohres, d. i. die Volumenmenge, welche in das eine Ende des Rohres eintritt, wenn das andere Ende mit einer Pumpe von unendlich großer Saugleistung verbunden ist. Nach Gaede muß diese Volumenmenge größer sein als die Saugleistung der Pumpe, damit letztere gut ausgenutzt ist. Für Gaedes Quecksilberluftpumpe ist die effektive Saugleistung etwa 100 cbcm per sec. Das genannte Rohr ist demnach für diese Pumpe zu lang oder zu eng.

Der große Vorteil, den hohe Luftverdünnungen für die wissenschaftlichen Forschungen bieten, ist nur zum kleinsten Teil durch die Verringerung der Zahl der Gasmoleküle bedingt. Bei einem Druck von 0,000001 mm Quecksilbersäule und bei 0° sind in 1 cbcm immer noch 37.10^9 Gasmoleküle vorhanden. Der große Vorteil des hohen Vakuums ist vielmehr durch die große freie Weglänge der Moleküle im Vakuum gegeben, d. h. die Strecke, welche die Moleküle frei durchlaufen können, ohne aufeinander zu stoßen. Diese Strecke ist umgekehrt proportional dem Druck und bei 0,1 mm von der Größenordnung 1 cm. Im Prinzip sind alle für die Theorie der Elektrizität so außerordentlich wichtigen Entladungserscheinungen in Gasen auch bei höheren Drucken vorhanden. Infolge der größeren freien Weglänge haben im höheren Vakuum die Elektronen und Ionen eine längere freie Bahn, so daß die Entladungserscheinungen in Gasen der Untersuchung zugänglicher werden. Bei dem höchsten angegebenen Vakuum von 0,000001 mm ist die freie Weglänge von der Größenordnung 100 m. Um mit den Quecksilberluftpumpen diese hohen Vakua tatsächlich zu erhalten, müssen die Wasserdämpfe und Quecksilberdämpfe besonders entfernt werden, am besten, indem man die Dämpfe in einem durch flüssige Luft gekühlten Teile des Rohres ausfrieren läßt.

Die doppelwandigen Dewargefäße (Thermosflaschen) zeigen eine sehr geringe Durchlässigkeit für Wärme, sobald der Raum zwischen den Wänden so hoch evakuiert ist, daß die freie Weglänge sehr groß ist gegenüber dem Abstand der beiden Wände. Die elektrischen Glühlampen werden so hoch evakuiert, daß die freie Weglänge groß ist gegenüber den Gefäßdimensionen, weil dann u. a. dem elektrischen Strome die Möglichkeit genommen ist, einen Weg in Form einer leuchtenden Entladung durch das Gas zu nehmen und dadurch eine rasche Zerstörung des Glühfadens herbeizuführen.

1b) Das Reibungsprinzip. Das Gemeinsame alle bisher beschriebenen Luftpumpen war, daß nach dem Vorgang von Otto v. Guericke eine gewisse Gasmenge abgegrenzt, von dem Rezipienten abgeschlossen und durch die Bewegung des Kolbens oder der als Kolben dienenden Flüssigkeit (Quecksilber, Wasser, Oel) dem Vorvakuum oder der Atmosphäre zugeführt wird. Beachtet man, daß bei Flüssigkeitspumpen und Ventilatoren sich außer diesem Prinzip der Volumentrennung auch das Schleuderprinzip bewährt hat, so besteht die Frage, ob z. B. eine Zentrifugalpumpe als Vakuumpumpe zu brauchen wäre. Der durch eine Schleuderpumpe erzeugte Druckunterschied ist proportional der Dichtigkeit des Gases, die Wirkung ist also um so schlechter, je höher das Vakuum ist. Daraus folgt, daß das Schleuderprinzip für Vakuumpumpen unbrauchbar ist.

Nach der kinetischen Gastheorie ist die innere Reibung unabhängig vom Druck. Eine Luftpumpe, bei welcher die treibende Kraft die Reibung ist, muß somit eine vom Druck unabhängige Wirkung geben. Der erreichte Effekt wird dann sehr günstig sein, wenn nur das Vorvakuum genügend hoch ist. Von dieser Ueberlegung ausgehend, erfand Gaede die Reibungsluftpumpe, welche den oben beschriebenen Vakuumpumpen in vielen Punkten überlegen ist. Das Prinzip derselben wird durch Figur 12 erläutert. Um die Achse a dreht sich der glatte Zylinder A in dem sehr eng umschließenden Gehäuse B. In dem oberen Teile des Gehäuses ist eine von m bis n reichende Nut von der Tiefe h eingeschnitten. Dreht sich A im Sinne des Uhrzeigers, so wird die Luft von n nach m mitgerissen. Kann die Luft nicht frei ausströmen, so zeigt ein bei n und m angeschlossenes Manometer bei n einen niedrigeren Druck als bei m. Beträgt z. B. die Druckdifferenz 10 mm, so wird der Druck bei m 760 mm, bei n 750 mm betragen. Setzen wir durch eine Pumpe den Druck bei m auf 30 mm herab, so wird er bei n 20 mm betragen. Setzen wir den Druck bei m auf 10 mm herab, so muß, wenn der Druckunterschied immer noch 10 mm ist, der Druck bei n gleich 0 sein. Dieser Schluß ist indessen nicht ganz richtig, wegen der diffusen Reflexion der Moleküle im Vakuum, eine Erscheinung, welche hydrodynamisch sich als „Gleitung“ der Gase an der Wand bemerkbar macht.

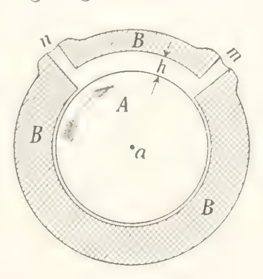
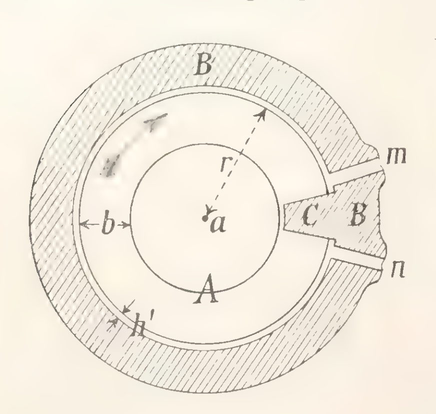


Fig. 12.

Treffen die Gasmoleküle auf eine Wand, so werden sie nach Maxwell und Knudsen nach allen Richtungen reflektiert, unabhängig vom Einfallswinkel. Die Molekülschwärme werden nach allen Richtungen zerstreut, wie das Licht von

einem glühenden Körper nach dem bekannten Cosinusgesetz. Gaede hat gezeigt, daß dieses Gesetz nur bei Drucken unterhalb 0.001 mm gilt, weil bei höheren Drucken die molekularen Rauheiten der Wand, welche eine Reflexion der Moleküle in absoluter Unordnung verursachen, durch eine Gashaut überdeckt werden. Ist A (Fig. 12) in Ruhe, so werden von der Zylinderoberfläche in der Richtung nach n ebenso viel Moleküle gestreut, wie in der Richtung nach m. Die Moleküle werden von der Zylinderoberfläche reflektiert, wie wenn dieselbe mit kleinen Geschützen besät wäre, deren Mündungen nach allen Richtungen weisen, und die Moleküle wie kleine Geschosse aus diesen Geschützen abgefeuert werden. Denkt man sich den Zylinder in der Richtung des Uhrzeigers so rasch in Rotation versetzt, daß die Peripheriegeschwindigkeit größer ist als die molekulare Geschoßgeschwindigkeit, welche bei Luft etwa $^1/_2$ km per sec beträgt, so werden nach n keine Moleküle zurückgeschossen und die Moleküle werden in der Richtung nach m mehr als die doppelte Geschwindigkeit annehmen. Wir haben somit bei n einen Verarmungsbereich an Molekülen: ein Vakuum. Die praktisch mögliche maximale Umfangsgeschwindigkeit des Zylinders ist indessen zehnmal so klein, so daß bei der Reflexion stets nach n eine gewisse Anzahl Moleküle zurückgelangen wird, die um so größer ist, je größer die Molekülgeschwindigkeit und je kleiner die Umfangsgeschwindigkeit ist. Für Luft mit der Molekülgeschwindigkeit von ½ km per sec ist somit eine günstigere Wirkung zu erwarten, als mit Wasserstoff von der Molekülgeschwindigkeit von 1,8 km per sec, was die Versuche auch bestätigen. Die Wirkung der Pumpe beruht demnach auf einer technischen Ausnutzung des molekularen Mechanismus der Gase, die Pumpe ist eine „Molekularluftpumpe".

α) Gaedes Reibungsluftpumpe oder Molekularluftpumpe. Die Molekularluftpumpe besteht in der einfachen Ausführung aus einem Gehäuse mit glattem Zylinder wie Figur 12. Um eine möglichst große Wirkung zu erhalten ist die Nute mn mehrmals spiralförmig um den Umfang herumgeführt. Von noch größerer Leistungsfähigkeit ist die Anordnung nach Figur 13, bei welcher in den um die Achse a rotierenden Zylinder A Nuten von der Tiefe b und der Breite h eingeschnitten sind. Im Abstand h' ist A umschlossen von einem zylindrischen Gehäuse B. An einer Stelle ragen die am Gehäuse B befestigten Lamellen C in die Nut hinein, so daß bei der Rotation von A im Sinne des Uhrzeigers das Gas von n nach m gefördert wird. Um die Wirkung zu verstärken, werden die einzelnen Nuten hintereinander geschaltet, indem die Oeffnungen m mit n_1; m_1 mit n_2 usw. verbunden werden, so daß der Druck in den nebeneinanderliegenden Nuten zunimmt. Die Nuten werden so geschaltet, daß der Gasdruck von den Zylinderenden nach der Mitte hin stetig abnimmt. Das Gehäuse ist geschlossen und mit luftdichten Lagern versehen, welche die Welle des Zylinders nach außen durchtreten lassen. An dem Gehäuse befinden sich zwei Düsen. An die eine wird die Vorpumpe angeschlossen, die andere führt zur mittleren Nut des Zylinders, in welcher der Gasdruck am kleinsten ist, und dient zum Anschluß des Rezipienten. Die Molekularluftpumpe wird von der Firma E. Leybolds Nachfolger in Köln a. Rh. fabriziert.



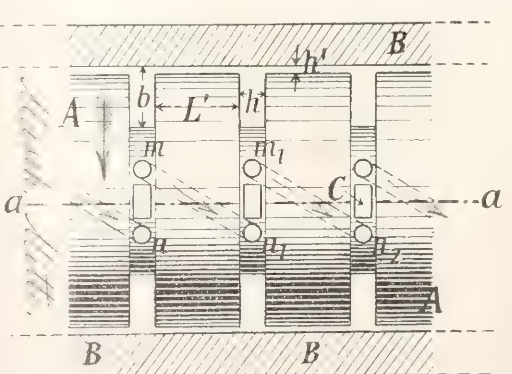


Fig. 13.

Die mathematische Theorie der Pumpe ist von Gaede ausgearbeitet und die Uebereinstimmung mit der Erfahrung festgestellt worden. Die Theorie zeigt unter anderem, daß im hohen Vakuum die Drucke an der Eintritts- und Austrittsöffnung einer Nut in einem ganz bestimmten Verhältnis k stehen, das außer von den Abmessungen der Pumpe von der Molekulargeschwindigkeit des Gases (resp. äußerer Reibung) und von der Rotationsgeschwindigkeit des Zylinders abhängt. Der prinzipielle Vorzug der Molekularluftpumpe vor den übrigen Pumpen ist der, daß die Pumpe nicht nur Gase, sondern auch Dämpfe aus dem Rezipienten absaugt und selbst keine Dämpfe abgibt, so daß z. B. die Verwendung von Phosphorpentoxyd oder Kühlgefäßen, welche bei den Quecksilberluftpumpen unbedingt notwendig sind, hier in Wegfall kommen. Das Prinzip, die

Gasreibung als die treibende Kraft bei Pumpen zu verwenden, bietet somit sehr erhebliche praktische Vorteile. Bei den älteren Pumpen spielte die Gasreibung natürlicherweise auch eine Rolle, aber nur eine sekundäre, indem durch die Reibung in den Zuleitungsröhren die Wirkung verschlechtert, durch die Reibung an den Ventilen und Kolben verbessert wurde, indem durch die Gasreibung ein Dichthalten derselben unterstützt wurde. Derartige Wirkungen fallen bei der Reibungspumpe fort, weil diese weder Ventile noch Kolben besitzt.

β) Wirkungsweise der Molekularluftpumpe. Zur Erläuterung der Wirkungsweise seien hier einige Versuche mit einer solchen Luftpumpe beschrieben. Wie Figur 14 zeigt, wurde diese mittels Riemenübersetzung durch einen Elektromotor b an-

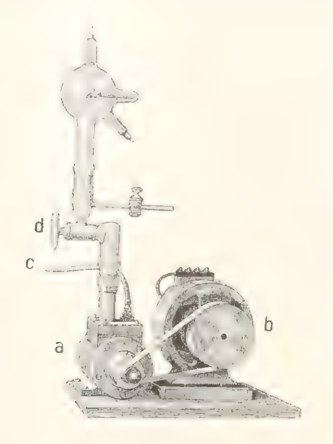


Fig. 14.

getrieben. Als Vorpumpe wurde eine Gaedesche Kapselpumpe verwendet und durch den Schlauch c mit der Molekularluftpumpe a verbunden. Eine Röntgenröhre von 1 l Inhalt wurde ohne Verwendung von Trockenmitteln auf die Pumpe aufgesetzt und konnte durch einen Hahn d abgesperrt werden. Bei einem Druck von ca. 5 mm beginnend, war die Röhre bei einem Versuch in 6 sec, bei einem anderen in 12 sec soweit evakuiert, daß die Funken an einer parallel geschaltenen 15 cm Funkenstrecke überschlugen. Bedenkt man, daß der gleiche Versuch mit einer Gaedeschen Quecksilberluftpumpe ausgeführt, etwa 100 sec beansprucht, so erkennt man die besonders im Vergleich zu ihrer kleinen Form erstaunlich rasche Wirkungsweise der Molekularluftpumpe. Zur vollen Ausnutzung so großer Pumpgeschwindigkeiten sind die unter 1*ϰ*) gegebenen Vorschriften über die Rohrweiten sorgfältig zu beachten, und es muß bei der Molekularluftpumpe die Leitungsfähigkeit des Röhrensystems größer sein als 1500 cbcm per sec. Die Verbindungsröhren im Hochvakuum müssen somit mindestens 3 cm weit sein.

Durchspült man bei dem beschriebenen Versuch das Vorvakuum der Molekularluftpumpe mit Luft, so ist das Vakuum in der Röntgenröhre so hoch, daß keine Entladung hindurch geht. Wurde dann das Vorvakuum mit Wasserstoff durchspült, so stellte sich das Druckgleichgewicht her, wie es der größeren Geschwindigkeit der Wasserstoffmoleküle entspricht. Die Röntgenröhre füllte sich soweit mit Wasserstoff, daß die elektrischen Entladungen durch die Röhre gingen, die grüne Glasfluoreszenz verschwand und Glimmentladung einsetzte. Ließ man dann wieder Luft durch das Vorvakuum strömen, so stieg das Vakuum, bis keine Entladung mehr durch die Röhre ging. Wird also das Vorvakuum dauernd mit Luft durchspült, so kann man auch bei Anwesenheit sehr leichter Gase und Dämpfe im Rezipienten die höchsten Vakua erzielen, weil der Partialdruck derselben in der Luft verschwindend klein ist.

Die Abhängigkeit der Höhe des erzeugten Vakuums von der Tourenzahl des Zylinders und von der Höhe des Vorvakuums zeigt folgende Tabelle. Es bedeutet darin, n die Drehungszahl, des Zylinders per min, p_1 den Druck in dem Vorvakuum, p_2 den Druck im Rezipienten.

n	p_1	p_2
12000	0,05	0,0000002
12000	1	0,000005
12000	10	0,00003
12000	20	0,0003
6000	0,05	0,00002
2500	0,05	0,0003

Die niedersten Drucke von 0,0000002 konnten nicht direkt gemessen werden, weil weil das Mac Leod genau den Wert 0 zeigte. Der Druck wurde in der Weise bestimmt, daß das Mac Leod mit der drittletzten Nut kommunizierte, und durch einen besonderen Versuch das Druckverhältnis zwischen Anfang und Ende der drei letzten Nuten bestimmt wurde. Die Zahlen zeigen uns, daß die Gaedesche Molekularluftpumpe nicht nur am schnellsten wirkt, sondern auch höhere Vakua gibt als alle übrigen Hochvakuumpumpen.

2. Kompressionsluftpumpen und ihre Anwendung. Die Kompressionspumpen pressen die Luft in ein geschlossenes Gefäß. Die Oekonomie spielt bei diesen Pumpen im Gegensatz zur Vakuumpumpe eine sehr große Rolle, so daß hier fast ausschließlich die Kolbenpumpe (Fig. 2) in Betracht kommt, weil bei einer solchen Maschine die Undichtigkeits- und Reibungsverluste am kleinsten sind. Sogar die Kompressionswärme der Luft ist von solchem Einfluß, daß man die Luft in verschiedenen Stufen komprimiert und nach jeder Kompression in Schlangenrohren mit Wasser kühlt. Zur Kühlung der Luft wird auch Wasser direkt in den Zylinder hineingespritzt. Große geschlossene Gefäße,

die Windkessel, dienen als Reservoir für die komprimierte Luft.

Kompressionspumpen werden zur Gasverflüssigung (Lindesche Maschine), zur Kälteerzeugung und zur Kräfteübertragung verwendet (Stoßbohrmaschine für Tunnelbauten, Luftbremse, Torpedo). Ein sehr wichtiges Anwendungsgebiet geben ferner die Unterwasserarbeiten, um den Tauchern oder den in den Taucherglocken oder Senkkästen befindlichen Arbeitern frische Luft zuzuführen.

3. Gebläse: Blasebalg. Wassertrommelgebläse. Roots Gebläse. Zentrifugalgebläse. Unter Gebläse, Exhaustor und Ventilator, versteht man mechanische Vorrichtungen, welche die Luft bewegen. Es kommt bei diesen Maschinen nur auf eine große geförderte Luftmenge an, während die erzeugte Druckdifferenz eine weniger große Rolle spielt. Die Oekonomie ist daher nicht so wichtig, wie bei den Kompressionspumpen und infolgedessen gibt es bei Ventilatoren eine große Variation der Konstruktionen. Abbildungen der ältesten Gebläse sind in den Ausgrabungen bei Theben 1500 v. Chr. gefunden und zeigen, wie Ledersäcke mit einer Schnur aufgezogen und mit dem Fuß zugetreten werden, um das Feuer bei einem Schmelzprozeß anzufachen. Die Vorrichtung ist der Vorläufer des in vielen Haushaltungen befindlichen Blasebalges. Das Wassertrommelgebläse beruht auf der Umkehr der Wasserstrahlluftpumpe. Das Rohr B (Fig. 8) führt in ein großes Gefäß, so daß das Wasser sich von der mitgerissenen Luft scheidet. Durch eine Oeffnung unten an dem Sammelgefäß fließt das Wasser ab, durch eine Oeffnung oben an dem Gefäß wird die

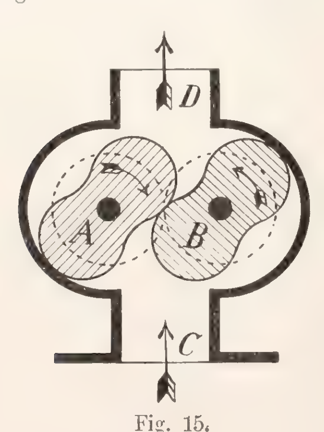


Fig. 15.

Luft herausgeblasen. Das Wassertrommelgebläse wird wegen seiner Einfachheit viel in Laboratorien für Gebläseflammen verwendet. Die Kolbenpumpe (Fig. 2) wurde als Zylindergebläse zuerst von Hero von Alexandrien verwendet, um ein Orgelwerk anzutreiben. Für die Hochöfen verwendet man heutzutage nicht mehr Zylindergebläse, weil diese zu viel Raum beanspruchen, sondern rotierende Gebläse. Das Rootsche Gebläse besteht aus zwei rotierenden Kolben (Fig. 15), welche durch Zahnräder gekuppelt, zwangsläufig im entgegengesetzten Sinn sich drehen. Durch die Bisquitform ist erreicht, daß die Kolben A und B sich stets auf einer Strecke berühren und damit die Luft von C nach D befördern. Solche Gebläse sind mit einem Kraftbedarf bis über 1000 PS. gebaut.

Das Schleuderprinzip eignet sich sehr gut für Gebläse. Papin ist der erste, der ein Zentrifugalgebläse gebaut hat. Eine Scheibe mit dem radialen Blechflügeln A (Fig. 16) dreht sich um die Welle a in dem

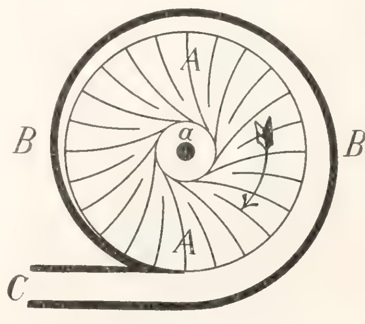


Fig. 16.

Gehäuse B mit großer Geschwindigkeit. Die frische Luft wird an der Welle zugeführt und durch die Zentrifugalkraft nach außen geschleudert und bei C ausgeblasen. Es sind Zentrifugalgebläse konstruiert worden, die bis 1 m Wassersäule Ueberdruck geben. Ventilatoren, bei denen auf der Welle eines Elektromotors eine Luftschraube sitzt, sind zur Lüftung von Wohnräumen sehr verbreitet.

Ein Zwischending zwischen Gebläse und Vakuumpumpen sind die Staubsauger. Das sind Luftpumpen oder Exhaustoren der oben beschriebenen Art, welche mit einer Düse verbunden werden, um aus dem Gewebe der Teppiche und Möbel den Staub herauszusaugen.

Literatur. *Historisches über Luftpumpen:* ***Gerland** und **Traumüller,** Geschichte der physikalischen Experimentierkunst. Leipzig 1899.* — *Spezielle Angaben über die Konstruktion älterer Pumpen:* ***Müller-Pouillet,** Lehrbuch der Physik. 1. Bd., Braunschweig 1906.* — ***Frick-Lehmann,** Physikalische Technik. 1. Bd. 2. Abteilung, Braunschweig 1905.* — *Spezielle Angaben über Konstruktion und Handhabung neuerer Pumpen: Prospekte und Gebrauchsanweisungen der im Text angegebenen Firmen.* — ***U. v. Reden,** Ueber eine neue Quecksilberluftpumpe und ein neues Vakuumeter. Physikalische Zeitschrift X, S. 316, 1909.* — ***W. Gaede,***

Die äußere Reibung der Gase. Berichte der naturforschenden Gesellschaft zu Freiburg i. B., 1911, XVIII. Bd., 2. Heft (Habilitationsschrift).

W. Gaede.

Luggin
Hans.

Geboren 1863 in Klagenfurt in Kärnten, gestorben am 5. Dezember 1899 in Klagenfurt. Er studierte in Wien, Straßburg, Prag, war von 1897 bis 1899 Privatdozent an der technischen Hochschule in Karlsruhe. Seine Arbeiten beschäftigen sich mit elektrischen Problemen, im besonderen untersuchte er photoelektrische Erscheinungen und die Leitfähigkeit des Lichtbogens.

E. Drude.

Lumineszenz.

1. Begriffe: a) Luminszenz und Temperaturstrahlung; Emission und Absorption. b) Umkehrung von Spektrallinien und Resonanzprinzip. 2. Leuchten der Gase und Dämpfe: a) Erregungsarten und Zusammenhang mit der Temperatur. b) Vorstellungen über die Lichtemission auf Grund des Aussehens der Banden- und Linienspektra. 3. Fluoreszenz und Phosphoreszenz: a) Fluoreszenz. b) Phosphoreszenz.

1. Begriffe. 1a) Lumineszenz und Temperaturstrahlung; Emission und Absorption. Unter Lumineszenz versteht die Physik alle die Arten des Leuchtens, die auf irgendeine andere Weise als durch Erhitzen entstehen, nämlich infolge eines chemischen oder elektrischen Prozesses oder durch direkte Wirkung fremden Lichtes oder auf mechanischem Wege. Je nach diesen verschiedenen Ursachen unterscheidet man Chemi- oder Elektrolumineszenz, Fluoreszenz, Phosphoreszenz, Tribolumineszenz usw. Im Gegensatz hierzu heißt das durch Erhitzung entstehende Leuchten „Temperaturstrahlung". Maßgebend ist also die Energieform, aus der die Strahlungsenergie eines leuchtenden Körpers stammt. Einen entsprechenden Unterschied macht man auch bei der Absorption von Strahlung je nach der Energie, in welche die absorbierte Strahlung verwandelt wird. Von einem Temperaturstrahler verlangt man, daß er die absorbierte Energie direkt und vollständig in Wärme überführt; alle Körper dagegen, die bei der Absorption von Strahlung infolge der Absorption andere Strahlung aussenden, heißen lumineszierend.

Der Begriff Lumineszenz ist von E. Wiedemann eingeführt worden, der 14 verschiedene Arten unterscheidet. Statt der Bezeichnungsweisen Temperaturstrahlung und Lumineszenz gebraucht R. von Helmholtz für die beiden Arten von Strahlung die Namen „regulär" und „irregulär", E. Warburg sagt „thermaktin" und „allaktin".

Die grundlegende Unterscheidung zwischen Temperaturstrahlung und Lumineszenz gründet sich auf die berühmten Untersuchungen von G. Kirchhoff aus dem Jahre 1859/62 „Ueber den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme". Hier wies Kirchhoff den engen Zusammenhang nach, der bei Temperaturstrahlung zwischen der Aussendung von Strahlung, Emission, und ihrer Vernichtung, Absorption, besteht und führte den „vollkommen schwarzen" Körper ein, der alle auf ihn fallende Strahlung absorbiert und direkt und vollständig in Wärme verwandelt. Er bezeichnete mit Absorptionsvermögen denjenigen Bruchteil der in einer bestimmten Richtung auf die Oberflächeneinheit eines Körpers auftreffenden Strahlung, der von diesem Körper verschluckt, „absorbiert" wird; ferner mit Emissionsvermögen eines Körpers eine Größe E von der Eigenschaft, daß $E d\lambda$ der gradlinig polarisierte Anteil der zwischen den Wellenlängen λ und $\lambda + d\lambda$ gelegenen Strahlungsenergie ist, der von dem betreffenden Körper in der Zeiteinheit innerhalb eines Kegels von unendlich schmaler Oeffnung ausgesandt wird. Kirchhoff bewies dann folgendes — heute nach ihm benanntes — Gesetz: Das Verhältnis $\frac{E}{A}$ von Emissions- zu Absorptionsvermögen bezogen auf Strahlen gleicher Wellenlänge und gleicher Polarisationsrichtung, die die Oberfläche eines Körpers in einer bestimmten Richtung verlassen bzw. treffen, dies Verhältnis ändert sich mit der Wellenlänge und Temperatur bei allen Temperaturstrahlern in der gleichen Weise, es hat also bei beliebiger Wellenlänge und Temperatur für alle Temperaturstrahler denselben Wert e, den der „schwarze" Körper bei dieser Wellenlänge und Temperatur hat, denn für ihn st $A = 1$:

$$E = A . e$$

Die meiste Energie einer bestimmten Wellenlänge sendet mithin unter allen Temperaturstrahlern der „schwarze" Körper aus, und wenn umgekehrt ein Körper mehr Energie, z. B. mehr sichtbares Licht ausstrahlt als der schwarze Körper derselben Temperatur, so kann die Strahlung keine Temperaturstrahlung sein. Nach Kirchhoff haben Stefan, Boltzmann und W. Wien weitere einfache Gesetze für die Strahlung des schwarzen Körpers abgeleitet, die durch die Versuche von Lummer-Pringsheim, Rubens, Kurlbaum und Paschen glänzend bestätigt worden sind. Auf Grund dieser Versuche hat schließlich

Planck das „Strahlungsgesetz" aufgestellt, das die allgemeine Abhängigkeit der Strahlung des schwarzen Körpers von Temperatur und Wellenlänge darstellt (vgl. Artikel „Strahlung").

Ist also das Absorptionsvermögen eines beliebigen Körpers bekannt, so ist auch seine Strahlung — vorausgesetzt, daß sie Temperaturstrahlung ist — durch das Kirchhoffsche und das Plancksche Gesetz als Funktion von Wellenlänge und Temperatur bestimmt. In der Tat hat sich diese Folgerung der Theorie so allgemein an den ein kontinuierliches Spektrum liefernden Körpern bewährt, daß man jene Gesetze, speziell das Kirchhoffsche Gesetz, geradezu als Definition und als notwendige und hinreichende Bedingung für Temperaturstrahlung ansieht.

1b) Umkehrung der Spektrallinien und Resonanzprinzip. Den Ausgangspunkt für die theoretischen Ueberlegungen Kirchhoffs bildeten freilich gerade seine Untersuchungen an den Spektrallinien leuchtender Dämpfe, nämlich die so berühmt gewordenen Versuche über die Umkehrung der Spektrallinien, die eine Erklärung der Fraunhoferschen Linien lieferten und dadurch auch für die Physik der Sonne und der anderen Gestirne von grundlegender Bedeutung geworden sind. Fraunhofersche Linien nennt man die von Fraunhofer entdeckten dunklen Linien, die das in einem Spektralapparat entstehende Sonnenspektrum parallel dem Spalt des Kollimatorrohrs durchziehen. Zwei der stärksten Fraunhoferschen Linien, die im Gelb gelegenen D-Linien, stimmen ihrer Lage im Spektrum, also ihrer Wellenlänge nach genau mit den beiden hellen Linien überein, die der Natriumdampf einer Flamme, spektral zerlegt, liefert. Kirchhoff brachte nun zwischen den Spalt eines Spektroskops und einen hellleuchtenden Körper, — einen glühenden Drummondschen Kalkzylinder, der wie alle leuchtenden festen Körper ein kontinuierliches Spektrum liefert — eine mit Kochsalz gefärbte Alkoholflamme und erblickte dann im Spektroskop an der Stelle der hellen gelben Natriumlinien auf dem Grund des kontinuierlichen Spektrums zwei dunkle Linien, die in jeder Hinsicht mit den Linien D des Sonnenspektrums übereinstimmten („Umkehrung der Spektrallinien"). Er schloß aus diesen und ähnlichen Beobachtungen an der im Rot gelegenen Lithiumlinie, daß farbige Flammen, deren Spektrum aus hellen, einfarbigen Linien besteht, die also „selektive Emission" besitzen, Strahlen von gerade der Farbe dieser Linie, die von einer fremden Lichtquelle kommen, nicht hindurchlassen, sondern sie absorbieren, daß sie dagegen für alles Licht anderer Wellenlänge durchsichtig sind. Bedingung dafür, daß die Linien auch tatsächlich dunkler als das umgebende kontinuierliche Spektrum erscheinen, ist außerdem offenbar die, daß die leuchtenden Dämpfe bei der Absorption dem auffallenden Licht mehr Energie entziehen als sie selber emittieren, daß also die absorbierte Energie größer als die von ihnen emittierte Energie derselben Farbe ist.

Wie sich gezeigt hat, haben alle leuchtenden Gase und Dämpfe diese Eigenschaft, stets ist mit „selektiver Emission" auch „selektive Absorption" verbunden.

Dies ist offenbar eine notwendige Folgerung des Kirchhoffschen Gesetzes; denn die Strahlung e des schwarzen Körpers ändert sich gleichmäßig und kontinuierlich mit der Wellenlänge, das Verhältnis E/A eines leuchtenden Dampfes kann mithin nur dann zugleich an den Wellenlängen der Spektrallinien und außerhalb derselben gleich e sein, wenn A an denselben Wellenlängen wie E groß bezw. klein ist, d. h. wenn E und A einander proportional sind. So bedeutete für Kirchhoff die Erscheinung der Linienumkehr, die ihn zur Entdeckung seines Gesetzes geführt hatte, zugleich eine experimentelle Bestätigung desselben. Infolgedessen war das Aufsehen groß, das die Untersuchungen verschiedener Physiker, besonders von E. Pringsheim, hervorriefen, nach denen gerade diese leuchtenden Gase und Dämpfe — im Gegensatz zu den leuchtenden festen und flüssigen Körpern — keine Temperaturstrahlung aussenden sollten, ihr Leuchten vielmehr als Lumineszenz anzusehen sei. Diese Forscher schlossen nämlich aus ihren Versuchen, daß es bis jetzt wenigstens nicht möglich ist, allein durch Temperatursteigerung eines Gases ein Linienspektrum hervorzurufen, sondern daß stets ein chemischer oder elektrischer Prozeß dazu nötig sei. Mithin dürfte für diese Gase das Kirchhoffsche Gesetz nicht gelten, jedenfalls würde die Erklärung der Linienumkehr durch dieses Gesetz hinfällig. Wie ist aber dann die Absorption gerade der Wellenlängen zu verstehen, die von den leuchtenden Gasen ausgesandt werden?

Hier hilft das Prinzip des Mitschwingens, der „Resonnanz", dessen Auseinandersetzung uns auf den Strahlungsvorgang selbst einzugehen zwingt. Ebenso wie wir das Entstehen von Tönen auf die Schwingungen einer Stimmgabel oder einer Membran zurückführen, erblicken wir die Ursache einer Lichterscheinung in Schwingungen der kleinsten Teile eines Körpers, der Moleküle und Atome, und der Elektronen im Innern der Atome (vgl. den Artikel „Elektron").

Jedes Atom denken wir uns nämlich

bestehend aus einem Elektron oder einer größeren Zahl von Elektronen, die alle eine gleichgroße negative Ladung besitzen, und aus einem entsprechend positiv geladenen Rest, dessen Größe wohl im wesentlichen die Atomgröße bestimmt; so ist das Atom im ganzen elektrisch neutral. Die Elektronen im Atom sollen imstande sein, Schwingungen um ihre Ruhelage auszuführen. Wie nun ein Schlag eine Stimmgabel zur Aussendung eines bestimmten Tones veranlaßt, dessen Schwingungszahl (Zahl der Schwingungen pro Sekunde) mit der der Stimmgabel übereinstimmt, ebenso soll ein an das Atom gebundenes Elektron durch irgendwelche Erregung in Schwingungen versetzt werden können und dadurch Licht einer bestimmten Wellenlänge λ und einer bestimmten Schwingungszahl N aussenden. Wir nennen N die Eigenschwingung dieses Teilchens, das wir allgemein als „Lichtzentrum" bezeichnen wollen.

Wie ferner eine Stimmgabel durch eine ihr gleiche in Mitschwingen, in „Resonanz" versetzt werden kann, ebenso soll auch unser Lichtzentrum durch diejenige unter den verschiedenen Farben des auffallenden Lichtes eines kontinuierlichen Spektrums in Mitschwingungen versetzt werden, deren Wellenlänge bezw. Schwingungszahl mit der Eigenschwingung des Lichtzentrums übereinstimmt. Dadurch wird der auffallenden Strahlung Energie entzogen, d. h. ein Teil dieser Energie wird „absorbiert" und offenbar gerade Energie von der Schwingungszahl, die das Lichtzentrum selbst zu emittieren imstande ist. Freilich ist zu vermuten, daß das Teilchen selber infolge des Mitschwingens Strahlung derselben Schwingungszahl aussendet — ebenso wie die resonierende Stimmgabel tönt; trotzdem nimmt ein Beobachter Absorption der betreffenden Farbe, speziell „Linienumkehr" wahr. Denn selbst wenn das mitschwingende Lichtzentrum die gesamte absorbierte Energie wieder ausstrahlte, würde sich die Ausstrahlung über die ganze Kugelfläche, mit dem Lichtzentrum als Mittelpunkt verteilen, während sich die Beobachtung der Linienumkehr nur auf einen schmalen Strahlenkegel erstreckt. Mithin wird die innerhalb dieses Kegels liegende Ausstrahlung des Lichtzentrums — wie übrigens auch bei der Stimmgabel — kleiner sein als die tatsächlich absorbierte Energie, und man muß im ganzen eine Schwächung der in dem Strahlenkegel vorhandenen Energie wahrnehmen. Freilich ist man gewöhnt das Mitschwingen der Stimmgabel gerade daran zu erkennen, daß sie auch zu tönen anfängt; die Strahlung des Lichtzentrums dagegen ist im allgemeinen nicht wahrnehmbar. Dies läßt sich dadurch erklären, daß das Lichtzentrum nicht wie die Stimmgabel isoliert im Raume vorhanden ist und daß es infolgedessen die absorbierte Energie im allgemeinen nur zum geringsten Teil direkt wieder ausstrahlen kann. Tatsächlich wissen wir heute noch wenig darüber, was aus der Schwingungsenergie des Lichtzentrums wird (vgl. den Artikel „Strahlungsumformung"). Ein direkter Uebergang in Wärme braucht jedenfalls nicht angenommen zu werden, obwohl es sich um Absorption von Strahlungsenergie handelt; nur bei Temperaturstrahlung wäre das eine notwendige Voraussetzung. Vermutlich wird das Lichtzentrum seine Schwingungsenergie z. T. durch Koppelung auf andere Lichtzentren übertragen, so daß diese, entsprechend ihrer Eigenschwingung, Strahlung anderer Farbe aussenden. Außerdem ist anzunehmen, daß alle Schwingungen von Zeit zu Zeit z. B. durch Zusammenstöße „gestört" und gedämpft werden (Theorie von H. A. Lorentz), wodurch die Schwingungsenergie in kinetische Energie, also in Wärme übergeht. Je stärker die auf eine der angedeuteten Weisen hervorgerufene „Dämpfung" der Schwingungen des Lichtzentrums ist, um so weniger „scharf" ist die Resonanz, auf um so mehr Perioden oberhalb und unterhalb der genauen Eigenschwingung erstreckt sich die Absorption, um so „breiter" ist die im Spektroskop beobachtete „Absorptionslinie".

Schließlich wird unser Lichtzentrum im Falle der sogenannten Fluoreszenz tatsächlich so stark in Mitschwingen versetzt, daß es selbst wahrnehmbares Licht aussendet oder andere gekoppelte Lichtzentren zum Aussenden von Licht anderer Farbe veranlaßt. Diese Erscheinungen, daß die belichtete Substanz durch die Belichtung zum Selbstleuchten gebracht wird, sollen im dritten Abschnitt ausführlich besprochen werden.

Mit Hilfe der Resonanz kann man also die „Umkehrung der Spektrallinien", die selektive Absorption der leuchtenden Gase und Dämpfe erklären, ohne von Temperaturstrahlung, ohne speziell vom Kirchhoffschen Gesetz Gebrauch zu machen.

Allerdings werden die besprochenen Anschauungen nicht allgemein anerkannt, besonders weil über die weitere Verwandlung der absorbierten, auf die schwingenden Teile übergegangenen Energie noch zu wenig bekannt ist. Manche Physiker betrachten vielmehr die Linienumkehr als einen Beweis der Gültigkeit des Kirchhoffschen Gesetzes für Gase und halten auch die Versuche von Pringsheim u. a. nicht für einwandfrei. So sind die Ansichten darüber geteilt, wieweit die Strahlung der Gase als Lumineszenz, wie weit sie als Temperaturstrahlung anzusehen ist. Ohne uns für die eine oder andere Ansicht zu ent-

scheiden, wollen wir nun im folgenden die verschiedenen Arten der Lumineszenz und überhaupt diejenigen Strahlenarten im einzelnen besprechen, die nicht zweifellos Temperaturstrahlung sind — sei es, daß die Art der Lichterregung in Frage steht, sei es, daß die Gültigkeit der Gesetze der Temperaturstrahlung bestritten wird. Allgemein haben die zu behandelnden Lichterscheinungen die Eigenschaft, im Spektroskop ein Linien- oder Bandenspektrum zu liefern.

Zunächst wollen wir uns mit dem Leuchten der Gase und Dämpfe befassen und versuchen, die Gründe darzulegen, welche für Temperaturstrahlung, welche für Lumineszenz sprechen. Dann wollen wir die Untersuchungen hervorheben, aus denen man sich bestimmte Vorstellungen von der Mechanik des Leuchtens bilden kann. Das letzte Kapitel behandelt schließlich die Erscheinungen der Fluoreszenz und Phosphoreszenz, Erscheinungen, bei denen außer Gasen auch feste und flüssige Körper ein Linien- oder Bandenspektrum aussenden.

2. Leuchten der Gase und Dämpfe. 2a) Erregungsarten und Zusammenhang mit der Temperatur. α) Giltigkeit der Strahlungsgesetze. Das Leuchten der Gase und Dämpfe wird entweder in Flammen und in geheizten Räumen, in Oefen, oder durch elektrische Entladungen erzeugt. In beiden Fällen kann man die Stärke der Erregung und dadurch auch das Aussehen des im Spektroskop wahrnehmbaren Spektrums in weiten Grenzen verändern; einerseits durch Benutzung verschieden temperierter Flammen und Oefen, andererseits bei elektrischer Erregung durch Variation der Entladungsart: Verwendung des Funkens, des Flammenbogens oder des sogenannten Geißlerrohrs (dies ist ein luftdicht geschlossenes Glas- oder Quarzrohr, das das betreffende Gas in verdünntem Zustande enthält und in das z. B. Platindrähte eingeschmolzen sind, zwischen denen die Entladungen einer Stromquelle hohen Potentials wie Induktorium, Hochspannungsbatterie, -dynamo — übergehen). Was nun die verschiedenen Spektren bei diesen verschiedenen Erregungsarten betrifft, so ist in vielen Fällen ein Zusammenhang mit der mittleren Temperatur des Dampfes oder leuchtenden Gases nicht zu verkennen.

Häufig konstatiert ist zunächst die Erscheinung, daß bei gesteigerter Temperatur die kürzeren Wellenlängen im Spektrum mehr an Helligkeit zunehmen als die längeren, oder daß jene überhaupt erst sichtbar werden. So erhält man ultraviolette Linien unterhalb 350 $\mu\mu$ in der Bunsenflamme nur sehr lichtschwach, heller schon in der Knallgasflamme und sehr intensiv im elektrischen Bogen und Funken, denen man auch höhere Temperatur zuschreibt. Dies erscheint in Uebereinstimmung mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz der Temperaturstrahlung (vgl. den Artikel „Strahlung"), nach dem die Hauptenergie im kontinuierlichen Spektrum eines schwarzen Körpers mit steigender Temperatur nach kürzeren Wellen zu rückt. Jedoch sind die untersuchten Dämpfe und Gase entfernt nicht als schwarz zu betrachten; ihr Absorptionsvermögen ist auch für die Wellenlängen der hellen Linien im allgemeinen weit kleiner als 1 und für verschiedene Linien verschieden groß. Infolgedessen kann sich das Verhältnis Emission durch Absorption E/A, das nach dem Kirchhoffschen Gesetz gleich der Emission des schwarzen Körpers derselben Wellenlänge und Temperatur ist, anders ändern als die Emission E. Gleichzeitige Messungen von E und A bei steigender Temperatur können also erst entscheiden; und zwar muß dabei die Absorption gemessen werden, die ein kontinuierliches Spektrum in dem leuchtenden Gas erfährt, und nicht etwa die „Linienabsorption", die eine gleiche Spektrallinie erleidet. Außerdem hat nur ein Vergleich der zu einer Serie gehörenden Linie einen Sinn, da höchstens diese dasselbe Emissionszentrum besitzen (s. u. 2b β). Schließlich kann man nicht ohne weiteres „intensivere Erregung" und „höhere Temperatur der Spektrallinie" identifizieren. So sind einwandfreie Messungen sehr schwierig und z. Zt. noch nicht soweit zum Abschluß gekommen, daß sie bindende Schlüsse erlauben.

Ferner hat man in jeder der verschiedenen Erregungsarten vielfach neben der selektiven Emission auch selektive Absorption nachgewiesen, sei es nach der oben beschriebenen Kirchhoffschen Methode der Umkehrung, sei es durch direkte quantitative Messung. Wie oben besprochen kann man diese Erscheinung als Beweis für die — wenigstens qualitative — Gültigkeit des Kirchhoffschen Gesetzes ansehen, freilich ist dies noch kein Beweis für Temperaturstrahlung. Eingehende Untersuchungen der letzten Jahre erlauben jedoch wenigstens an Flammen bei Zugrundelegung der Strahlungsgesetze aus Umkehrungsversuchen die „Temperatur der betreffenden Spektrallinie" zu messen. Bei diesen Versuchen bringt man zwischen einen schwarzen Körper und das Spektroskop die betreffende gefärbte Flamme und reguliert die Helligkeit des schwarzen Körpers, bis sich im Spektroskop die untersuchte Spektrallinie von dem kontinuierlichen Grund weder hell noch dunkel abhebt. Nach den Gesetzen der Temperaturstrahlung muß dann für die betreffende Linie $E = A.e$, also die „Temperatur der Spektrallinie" mit der des schwarzen Körpers identisch sein. In der Tat ergeben sich die so gewonnenen Tem-

peraturen meist in ungefährer Uebereinstimmung mit der auf verschiedene Weise direkt gemessenen mittleren Flammentemperatur. Durch ähnliche Versuche hat sich für die ultrarote Emission und Absorption von heißer Kohlensäure und heißem Wasserdampf das Kirchhoffsche Gesetz und einige seiner Folgerungen quantitativ als gültig erwiesen. Schließlich haben die neuesten Versuche ergeben, daß Thalliumdampf, in ein Quarzröhrchen eingeschlossen, im Innern eines hoch erhitzten schwarzen Körpers dem Kirchhoffschen Gesetz in erster Annäherung gehorcht, also im wesentlichen nach unserer Definition Temperaturstrahlung aussendet.

Auf der anderen Seite stehen die oben erwähnten Versuche von Pringsheim u. a., nach denen es nicht möglich ist, allein durch Temperaturerhöhung einen Dampf oder ein Gas zur Aussendung von Spektrallinien zu bringen. Vielmehr soll in Flammen und Oefen ein chemischer Prozeß, vermutlich ein Reduktionsvorgang, in elektrisch erregten Gasen direkt oder indirekt ein elektrischer Prozeß die Erregungsursache sein; eine Reihe von Physikern, vor allem Kayser, halten diese Versuche allerdings nicht für überzeugend, und Bandenspektra besonders im Ultrarot können nach den allgemein anerkannten Messungen von Paschen tatsächlich durch Temperatursteigerung erzeugt werden. Gegen Temperaturstrahlung der Gase spricht ferner noch die Tatsache (E. Wiedemann, Warburg, Wood), daß in vielen Fällen die mittlere Temperatur helleuchtender Gase z. B. in weiten Geißlerröhren nur 100° und darunter ist, also zweifellos weit unter der Temperatur liegt, bei der ein schwarzer Körper sichtbares Licht aussendet.

Diese Eigenschaft der Geißlerröhren benutzt die Technik in den letzten Jahren auch zu Beleuchtungszwecken; beim sogenannten Moore-.icht z. B. werden Geißlerröhren verschiedner Gasfüllung verwandt, deren Vakuum sich selbstständig reguliert. Derartige Lampen liefern ein sehr gleichmäßiges und heute bereits ebenso billiges Licht wie die Metallfadenlampen.

β) Neuere Anschauungen. Diese scheinbaren Widersprüche können wohl durch folgende, von vielen geteilte Anschauung einigermaßen überbrückt werden. Aus Messungen der mit selektiver Absorption notwendig verknüpften anomalen Dispersion (vgl. den Artikel „Lichtdispersion") und auf Grund ähnlicher Erscheinungen hat sich ergeben, daß in Flammen und Oefen, im elektrischen Bogen und besonders in Geißlerröhren nur eine im Verhältnis zur Gesamtmolekülzahl sehr geringe Zahl absorbierender Zentren vorhanden ist (1:100 bis 1:100000). Da jedes emittierende Zentrum schwingungsfähig und deshalb nach allgemeiner Ansicht auch Absorptionszentrum ist, wirken höchstens ebenso viel Teile auch an der Emission mit. Sind diese Zentren — ob durch Temperaturerhöhung, durch einen chemischen Prozeß, oder auf was für eine Weise auch immer — erst geschaffen und befindet sich außerdem der übrige Teil des Dampfes auf genügend hoher Temperatur, wie im Falle einer leuchtenden Flamme oder eines erhitzten Ofens, so können sich die an der Strahlung beteiligten Moleküle mit den übrigen in ein Temperaturgleichgewicht setzen und die Strahlung wird dann den Gesetzen der Temperaturstrahlung in großer Annäherung genügen. So kann die „Temperatur der Spektrallinie" annähernd mit der mittleren Temperatur des Dampfes übereinstimmen.

Wird andererseits das betreffende Gas nicht durch äußere Wärmezufuhr auf eine hohe Temperatur gebracht, so ist klar, daß die mittlere Temperatur der relativ wenigen an der Strahlung beteiligten Moleküle hoch sein kann, ohne daß dadurch die ganze Gasmasse merklich erwärmt wird. Infolgedessen ist es sogar nicht undenkbar, daß auch bei niedriger mittlerer Gesamttemperatur die Strahlung selbst nach den Gesetzen der Temperaturstrahlung erfolgt.

So ist auch heute noch die über 30 Jahre alte Frage nach der Natur der Strahlung der Gase nicht entschieden, obgleich die elektronentheoretische Auffassung in den letzten Jahren viel Klarheit gebracht und die ganze Fragestellung etwas verschoben hat.

2b) Vorstellungen über die Lichtemission auf Grund des Aussehens der Banden- und Linienspektra. *α*) Bandenspektra. Die wichtigste Frage lautet nämlich heute: Wie kann man aus den verschiedenen Arten und dem verschiedenen Aussehen der Spektra einen Einblick in die Vorgänge und die Kräfte im Molekül und Atom gewinnen?

Von größter Bedeutung ist hierfür zunächst die Unterscheidung zwischen Linien und Banden und die Einordnung von Linien in „Serien". Neben den bisher meist besprochenen Linien weisen die Spektra von Gasen und Dämpfen häufig „Banden" auf, breitere Spektralstreifen, die bei großer Auflösung, d. h. weiter Auseinanderziehung des Spektrums (z. B. mit Hilfe vieler Prismen oder eines Gitters) in eine große Zahl feiner heller Linien zerfallen, die an einzelnen Stellen sehr nahe zusammenliegen, und sich von diesen Punkten ab, den Bandenkanten oder Köpfen, nach rot oder violett hin immer weiter voneinander entfernen (vgl. den Art. „Spektroskopie"). An diesen Banden linien lassen sich nach den Untersuchungen Deslandres gewisse Gesetzmäßigkeiten der Anordnung feststellen, von denen man Schlüsse über die Natur der Träger der Ban-

den erhofft. Bisher hat sich gezeigt, daß alle chemischen Verbindungen, also alle zusammengesetzten Moleküle, Banden liefern, während die Spektrallinien nur von chemischen Elementen, also Atomen, bezw. Schwingungen im Atom herrühren. Allerdings liefern auch einzelne Elemente bei niedriger Temperatur bezw. schwacher Erregung Banden, erst bei starker Erregung, bei der vermutlich Dissoziation eintritt, Linien, — weshalb man allgemein die Banden „zusammengesetzten Komplexen" zuspricht.

β) Linienserien. Viel ausgedehnter sind unsere Kenntnisse von den Linienserien. Unter den bisweilen nach Hunderten zählenden Linien eines Spektrums sind zusammengehörige Linien aufgefunden worden, die ähnliche Eigenschaften zeigen — bez. ihres Aussehens und ihres Verhaltens unter der Einwirkung eines Magnetfeldes oder einer Druckänderung u. dgl. — und deren Schwingungszahlen in einfachen Beziehungen stehen. Deshalb nimmt man an, daß diese verschiedenen „Linien einer Serie" von einem einzigen Schwingungszentrum erzeugt sind. Man unterscheidet heute bei den meisten Substanzen zwei „Haupt"- und zwei „Nebenserien", und man versucht aus den Beziehungen zwischen den Schwingungszahlen dieser verschiedenen einem Erregungszentrum entsprechender Spektrallinien Schlüsse auf den Bau des Atoms zu ziehen. Zunächst hatte man sich allerdings ziemlich erfolglos bemüht unter den Schwingungszahlen eines Linienspektrums harmonische Obertöne eines — natürlich im Ultrarot gelegenen — Grundtons zu finden. Dann aber ist es besonders den Untersuchungen von Balmer, Rydberg, Kayser-Runge und Ritz gelungen, Gleichungen mit nur wenig Konstanten aufzustellen, aus denen sich alle Schwingungszahlen der Linien einer Serie mit einer in der Physik beispiellosen Genauigkeit berechnen lassen. So hat man z. B. die Lage der 31 bekannten Linien der sogenannten „ersten Nebenserie" des Wasserstoffes mit einem an der Meßgrenze liegenden Fehler von 1 auf 30000 durch eine Gleichung mit nur einer einzigen Konstanten darstellen können; diese eine Konstante ist überdies aus der Lage der „Häufungsstelle" zu entnehmen, an der diese Linien immer näher und näher aneinander und schließlich untrennbar zusammenrücken. Am weitesten in der Vereinfachung der Gesetzmäßigkeiten ist bisher W. Ritz gelangt, der alle bekannten Serien aller Substanzen durch eine einzige Gleichung ausdrückt, die eine universelle Konstante und drei für jede Substanz charakteristische Konstanten enthält. Zugleich berechnet er ein Modell, dessen elastische Eigenschwingungen durch eine derartige Gleichung darstellbar sind; schließlich hat Ritz (1908) Systeme einfachster Art („magnetische Atomfelder") angeben können, die die Seriengesetze ergeben und deren Energie rein elektromagnetisch ist. Auf diesem Wege kommt man also aus Spektralbeobachtungen zu Vorstellungen über den Bau und die Kräfte im Atom.

Dies scheint um so mehr berechtigt, als sich nahe Beziehungen zwischen der Anordnung der chemischen Elemente im Mendelejeffschen System und den Serien der betreffenden Elemente gezeigt haben. Aehnliche Elemente im Mendelejeffschen Sinne zeigen ähnliche Serien, z. B. besitzen alle Serien der ersten und dritten Kolonne des Mendelejeffschen Systems (die Elemente Li, Na, Ka, Rb, Cs und B, Al, Ga, In, Tl) Paare, die der zweiten Kolonne Triplets, d. h. sie treten stets zu zweit, bezw. zu dritt auf, wobei der Abstand je zweier Komponenten, gemessen in Schwingungszahlen, konstant ist und die Schwingungsdifferenzen in nahen Beziehungen zum Atomgewicht stehen.

γ) Träger der Lichtemission. Eine andere Frage, die die Spektroskopie beantworten soll, ist die, wer die eigentlichen Träger des ausgesandten Lichtes sind, ob das Molekül, das neutrale oder das geladene Atom, und letzteres wiederum, nachdem es ein oder mehrere Elektronen verloren bezw. gewonnen hat. Die aufgestellten Hypothesen sind mannigfaltig. Allgemein sieht man aber die Träger der Banden- und der Serienlinien als nicht identisch an und betrachtet die Atome als Zentra der Serienlinien —, die „zusammengesetzten Komplexe" (s. 2 b *α*) als Zentra der Bandenlinien. Die verbreitetste Ansicht scheint mir heute die zuerst von Lenard vertretene zu sein, daß der Zusammenstoß eines Elektrons mit einem Atom oder einem Ion mit Schwingungen verknüpft ist und daß dadurch die Strahlung erfolgt. P. Lenard hat seine Ansicht durch Untersuchung der Spektra gefärbter Flammen und des elektrischen Flammenbogens gewonnen, indem er in dem elektrischen Felde zweier entgegengesetzt geladener Platten die geladenen und ungeladenen Lichtzentra trennte. Er schloß, daß die sogenannte „scharfe Hauptserie" von neutralen Teilchen, die verschiedenen „Nebenserien" von verschieden stark positiv geladenen Teilchen ausgehen. Im gewissen Gegensatz dazu stellte Stark auf Grund der Versuche an elektrisch erregten Gasen die Hypothese auf, daß die Träger der Serienspektren allgemein positive Atomionen seien und machte auf Grund dieser Hypothese die wichtige Entdeckung des Dopplereffektes der von den Kanalstrahlen ausgesandten Spektrallinien, d. s. die lichtaussendenden Strahlen, die sich im Geißlerrohr in der Nähe der Kathode im entgegengesetzten Sinne

wie die Kathodenstrahlen bewegen. Weitere Untersuchungen der Eigenschaften der Kanalstrahlen haben aber W. Wien und andere Forscher zu der Ansicht geführt, daß auch in den Kanalstrahlen die Lichtemission im Augenblick des Zusammenstoßes mit einem Elektron erfolgt (vgl. den Art. „Kanalstrahlen"). Ebenfalls durch verschiedene elektrische Zustände des Atoms sucht man den von leuchtenden Dämpfen meist gleichzeitig mit den Linien ausgesandten kontinuierlichen Spektralgrund zu erklären. der im allgemeinen viel geringere Helligkeit als die Spektrallinien hat.

Schließlich führt auch das Aussehen der einzelnen Linien, ihre Breite und ihre Struktur sowie ihr Verhalten bei hohen Drucken (Humphreys) und im Magnetfeld (Zeemaneffekt) zu Schlüssen über die Atomvorgänge während der Lichtemission.

Unter Breite versteht man den Wellenlängenbereich, den eine „Spektrallinie" im Spektroskop einnimmt. Bei Besprechung der Umkehrung der Spektrallinien und ihrer Erklärung durch Resonanz (s. 1b) haben wir bereits gesehen, daß diese Breite der Absorptionslinien wesentlich von der Dämpfung der Schwingungen, also von der Zeit abhängt, während der ein Teilchen ungestört strahlt. Aehnliches gilt für die Emissionslinien. Außerdem kommt für die Breite vor allem noch die Zahl der leuchtenden Teile pro Einheit der strahlenden Oberfläche und die Geschwindigkeit der leuchtenden Teile (Dopplereffekt) in Betracht.

Unter Struktur versteht man erstens die zuerst von Michelson untersuchte Intensitätsverteilung im Innern einer Spektrallinie und zweitens die Erscheinung, daß die meisten bekannten Linien „Trabanten" besitzen. Dies sind feine „Nebenlinien", die, in wechselnder Anzahl, in Abständen von meist kleinen Bruchteilen einer Angströmeinheit von der Hauptlinie entfernt auftreten und nur bei größter „Auflösung" wahrnehmbar sind (mittels der Lummerschen Glasplatte, dem Interferometer oder dem Stufengitter Michelsons oder der Perot-Fabryschen versilberten Luftplatte).

Allerdings sind unsere Vorstellungen auf Grund dieser Versuche noch so wenig entwickelt, daß ich mich mit diesem Hinweis begnüge, zumal die tatsächlich beobachteten Erscheinungen in den Artikeln „Spektroskopie", „Lichtinterferenz" und „Magnetooptik" besprochen werden.

3. Fluoreszenz und Phosphoreszenz. Als Fluoreszenz und Phosphoreszenz bezeichnet man die verschiedenen Arten des Selbstleuchtens, besonders von festen und flüssigen Körpern, welches bei mittleren Temperaturen unterhalb der Rotglut stattfindet. Da diese Definition dem Kirchhoffschen Gesetz direkt widerspricht, sind Fluoreszenz und Phosphoreszenz die eigentlichen und unbestrittenen Vertreter der Lumineszenzphänomene. Sie sind wohl heute als im Grunde gleiche oder wenigstens sehr ähnliche Erscheinungen anzusehen (vgl. 3b η), die historische Entwickelung und unsere unvollkommene Kenntnis zwingt jedoch zu einer getrennten Behandlung.

3a) Fluoreszenz. α) Historisches. Unter Floureszenz versteht man mit E. Wiedemann das Leuchten, das infolge und während des Auftreffens von Licht von dem betroffenen Körper ausgeht. Bisweilen wird die Bezeichnung Fluoreszenz auch für andere, stets aber für kurz andauernde Lumineszenzerscheinungen gebraucht (vgl. Erregung durch Kathodenstrahlen unter 3b γ). Bekannt ist die Erscheinung der Fluoreszenz wohl schon seit 1570 (s. die Darstellung über Fluoreszenz und Phosphoreszenz von H. Konen in Kaysers Spektroskopie IV S. 590 bis 1240), besonders an Lösungen, die dem „nephritischen Holz" entzogen wurden, und die hervorragendsten Forscher wie Newton, Boyle, Goethe, Herschel und Brewster haben viele Untersuchungen über Fluoreszenz ausgeführt; aber der wesentliche Charakter dieser Erscheinung als der eines Selbstleuchtens des belichteten Körpers wurde erst von G. G. Stokes erkannt, dessen Untersuchungen über Fluoreszenz infolgedessen die Grundlage unserer Kenntnis auf diesem Gebiete bilden.

β) Natur des Fluoreszenzlichtes. Läßt man z. B. Sonnenlicht auf eine grüne Chlorophyllösung fallen, so nimmt man im allgemeinen nur ein schwaches farbiges (rotes) Leuchten der Oberfläche wahr („epipolische Dispersion"). Vereinigt man aber mit einer Linse Sonnenstrahlen in einer durchsichtigen und farblosen Chininlösung, so geht, wie Brewster zeigte, blaues Fluoreszenzlicht nicht nur von der Oberfläche, sondern auch von tieferen Flüssigkeitsschichten nach allen Seiten hin aus („innere Dispersion") und macht so den Weg der konvergierenden Sonnenstrahlen sichtbar (zur Demonstration des Weges von Lichtstrahlen vielfach benutzt). Dieses Fluoreszenzlicht zeigen fast alle bekannten, besonders die farbigen, flüssigen und festen Körper, die meisten Lösungen von Pflanzenstoffen, ebenso wie eine große Zahl von Kristallen und Gasen; — nach dem Flußspat (Fluorcalcium) hat Stokes die Erscheinung Fluoreszenz benannt. Das Fluoreszenzlicht unterscheidet sich aber wesentlich von dem Licht, das von beleuchteten, gewöhnlich farbigen Substanzen reflektiert wird: es ist im allgemeinen unpolarisiert, auch wenn das einfallende Licht polarisiert ist; es besteht aus inkohärenten, nicht interferenzfähigen, also freien Schwingungen, und es ruft drittens auf einer zweiten gleichen Substanz nicht wieder Leuchten hervor. Die beiden ersten Punkte zeigen, daß die Fluoreszenz als ein Selbstleuchten aufzufassen ist (Stokes); die dritte

Eigenschaft ist nur zu verstehen, wenn man annimmt, daß das vom untersuchten Körper ausgesandte Fluoreszenzlicht andere Farbe oder wenigstens andere spektrale Zusammensetzung hat als das auffallende, d. h. daß die Fluoreszenz auf einer Umwandlung von Strahlung in solche anderer Wellenlänge beruht.

γ) Spektrale Untersuchung. Dies läßt sich tatsächlich leicht experimentell beweisen (Stokes). Entwirft man nämlich in der üblichen Weise mittels eines Prismas mit vertikaler brechender Kante ein horizontal ausgebreitetes Sonnenspektrum auf einer ausgedehnten fluoreszenzfähigen Fläche, so erscheint das Spektrum von Rot bis etwa zur Fraunhoferschen Linie G (Fig. 1) in derselben Farbenfolge von der Fläche reflektiert, von da ab aber in anderen Farben, die von der Fluoreszenz der Substanz herrühren, und zwar erstreckt sich die Fluoreszenz weit über das gewöhnlich sichtbare violette Ende hinaus, ins Ultraviolett hinein. So wird also auch dieser, gewöhnlich unsichtbare Teil des Sonnenspektrums sichtbar (in der Figur 1

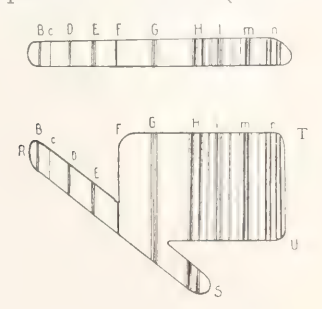


Fig. 1.

rechts von der Frauenhoferschen Linie H), über den vor Stokes wenig bekannt war.

Zur spektralen Untersuchung des Fluoreszenzlichtes zerlegt man nach Stokes das von der Substanz kommende Licht in einem Prisma mit horizontaler Kante. Dadurch entsteht das eigentümliche Spektrum RTUS; RS ist das gewöhnliche, von der Oberfläche reflektierte Licht, das im zweiten Prisma je nach der Farbe verschieden stark nach unten abgelenkt ist, TU das Fluoreszenzlicht, in welchem die Farben im horizontalen Streifen von rot längs des oberen Randes bis violett längs des unteren Randes aufeinander folgen (Methode der „gekreuzten Prismen"). So kann man in der Tat das von verschiedenfarbigem Licht erregte Fluoreszenzlicht spektral zerlegen und untersuchen.

Das kurzwellige ultraviolette Licht ist sogar besonders wirksam, also auch jede Lichtquelle, die reich an solchen Strahlen ist, wie Bogenlampe, elektrischer Funke, Quecksilberlampe usw.[1]) Mit bestem Erfolge verwendet man deshalb neuerdings zur Untersuchung der Fluoreszenz statt der Methode der gekreuzten Prismen sogenannte „Ultraviolettfilter" (vgl. den Artikel „Strahlungsumformungen"), die alles sichtbare Licht absorbierend nur ultraviolettes Licht durchlassen, so daß alles von der Substanz kommende sichtbare Licht Fluoreszenzlicht ist.

Durch Benutzung solcher Methoden sind viele neue fluoreszierende Substanzen aufgefunden worden. Heute kann man sagen, daß die Fluoreszenz eine ganz allgemeine Eigenschaft fast aller bekannter Körpern ist. Ein Verzeichnis der wichtigsten Substanzen findet sich bei Konen (l. c. S. 1100 bis 1200).

Sehr geeignet zur Untersuchung des ultravioletten Spektrums ist das aus Kubaholz zu gewinnende Morin, das äußerst intensiv grün fluoresziert. Bestreicht man ein weißes Papier mit Baryumplatincyanür und beleuchtet es durch ein gelbes Glas hindurch, so erscheint die mit Sonnenlicht beleuchtete Schrift, da gelb auf gelbem Grunde, fast gar nicht; sie erscheint aber sofort, wenn man statt des gelben ein blaues Glas vor die Sonnenstrahlen hält (Zauberschrift).

δ) Stokessche Regel. Stokes betrachtete es allgemein als gültige Regel, daß das erregte Licht längere Wellenlänge als das erregende hat. Jedoch glaubten E. Lommel u. a. (1871) Ausnahmen von diesem Stokesschen Gesetz zu finden. Der Streit um seine Gültigkeit währte über 20 Jahre hindurch; heute erkennt man wohl allgemein an, daß es Substanzen gibt, für die das Stokessche Gesetz nicht gilt. Andererseits liegen nach den jüngsten Untersuchungen von Nichols und Merrit der Bereich und das Maximum einer Fluoreszenzbande meist, aber auch nicht immer, im Sinne größerer Wellenlängen als Bereich und Maximum des wirksamen Lichtes. Das Stokessche Gesetz hat also offenbar einen tieferen Grund, dessen theoretische Bedeutung aber noch nicht erkannt ist.

ε) Zusammenhang mit der Absorption. Fluoreszenzerregend wirkt nur das Licht, das absorbiert wird. Diese notwendige Folge des Gesetzes der Erhaltung der Energie hat sich durchaus bewährt. Hält man z. B. eine Uranglasplatte in ein horizontal ausgebreitetes Spektrum, so geht rotes bis gelbes Licht hindurch, im blauen und violetten Teil des Spektrums wirft das Uran einen Schatten und fluoresziert hellgrün. Deshalb scheint das Fluoreszenzlicht meist nur von der Oberfläche einer bestrahlten Substanz zu kommen; das wirksame Licht wird rasch absorbiert und dringt

[1]) Hierauf beruht die Sichtbarmachung von ultraviolettem Licht mittels eines Fluoreszenzokulars (Soret); in der Brennebene des Beobachtungsfernrohrs wird eine Platte aus fluoreszierender Substanz (z. B. Uranglas) angebracht und diese durch ein gewöhnliches, schräg gestelltes Okular betrachtet.

im allgemeinen nicht in große Tiefen. Das Fluoreszenzlicht andererseits liegt seiner Wellenlänge nach häufig auch noch innerhalb der Absorptionsbande, wird deshalb auch absorbiert und alles aus größeren Tiefen kommende Licht wird so auf seinem Wege geschwächt. Zum genauen Vergleich der Helligkeiten verschiedener Fluoreszenzlösungen muß man also diese Absorption im Flüssigkeitsinnern berücksichtigen. Rechnet man hierzu die Lichtschwäche des Fluoreszenzlichtes, so werden die Schwierigkeiten genauer Messungen und die jahrelangen Streitigkeiten um einzelne Fragen verständlich.

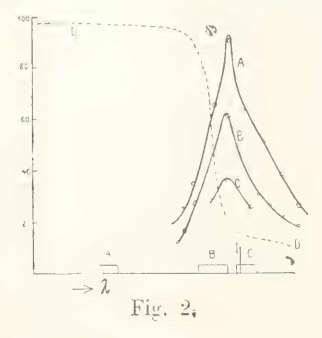


Fig. 2.

Die Figur 2 stellt Versuche von Nichols und Merrit an einer sehr verdünnten Eosinlösung dar. Abszissen sind Wellenlängen (λ), Ordinaten Helligkeiten des Fluoreszenzlichtes. Die auf der Abszissenachse angegebenen Stellen ABC bedeuten die aus der erregenden Lichtquelle ausgeschnittenen Spektralbezirke, und ihnen entsprechen die Fluoreszenzkurven des gleichen Buchstabens. Die gestrichene Kurve D bedeutet die Absorption der Substanz, der bei l befindliche Strich der Abszissenachse die längste wirksame Wellenlänge des Bezirks C. Das Licht ist also nur fluoreszenzerregend, soweit es in das Absorptionsgebiet fällt. Die Fluoreszenzbande C widerspricht offenbar z. T. dem Stokesschen Gesetz. Die Lage und Intensitätsverteilung einer Fluoreszenzbande dieser und ähnlicher Flüssigkeiten ergibt sich nach derartigen Versuchen von Nichols und Merrit als unabhängig von der Wellenlänge oder Zusammensetzung des erregenden Lichtes, wenn dieses nur in die Absorptionsbande fällt. Das Fluoreszenzlicht ist also wohl als gedämpfte Eigenschwingung gewisser Zentren aufzufassen.

ζ) Lichtelektrische Beziehungen und chemische Konstitutionen. Da selektive Absorption im engen Zusammenhang zur chemischen Konstitution der absorbierenden Substanz steht und nach der elektromagnetischen Lichttheorie das Vorhandensein von Ionen oder Elektronen voraussetzt, muß die an Absorption gebundene Fluoreszenz gleiche Beziehungen aufweisen. In der Tat verstärken alle Mittel zur Vergrößerung der Zahl der freien Ionen von Lösungen ihre Fluoreszenz, wenn man wohl auch nicht sagen kann, daß die Ionen die alleinigen Träger der Fluoreszenz der Lösungen seien. Ferner sind viele fluoreszierende Substanzen „lichtelektrisch empfindlich", d. h. sie geben bei Belichtung mit fluoreszenzerregendem Licht Elektronen ab (G. C. Schmidt, I. Stark).

Die Versuchsanordnung ist hierbei z. B. die folgende (Stark): man breitet eine fluoreszenzfähige Substanz auf einer Glasplatte aus und bringt über ihr, elektrisch isoliert, ein Metalldrahtnetz an, durch das hindurch die Lösung mit ultraviolettem Licht einer Quecksilberlampe belichtet wird. Das Drahtnetz ist mit dem positiven Pol einer Akkumulatorenbatterie verbunden, deren anderer Pol geerdet ist; die fluoreszenzfähige Substanz ist in elektrischem Kontakt mit einem Elektrometer. Beim Belichten lädt sich das Elektrometer positiv auf und erlaubt die von der Substanz auf das positive Drahtnetz übergegangene Menge negativer Elektrizität zu messen.

So fand Stark, daß alle fluoreszierenden Benzolderivate den „lichtelektrischen Effekt" zeigen, und zwar um so stärker, je stärker sie fluoreszieren. Ebenso haben Lenard und Sem Saeland die innige Beziehung zwischen Phosphoreszenz und lichtelektrischer Empfindlichkeit nachweisen können und gezeigt, daß ausschließlich dieselben Wellenlängen lichtelektrisch wirksam sind, welche auch die Phosphoreszenzbanden erregen.

Freilich liegen quantitative Resultate wegen der großen Versuchsschwierigkeiten zur Zeit noch nicht vor; ferner ist dieser Effekt noch bei weitaus nicht allen fluoreszierenden und phosphoreszierenden Körpern nachgewiesen. Trotzdem scheinen die gefundenen Beziehungen von höchster Wichtigkeit und bilden vielleicht den größten Fortschritt der letzten Jahre in unserer Kenntnis der Fluoreszenz- und Phosphoreszenzerscheinungen. Denn sie zeigen den Zusammenhang zwischen Lumineszenz und elektrischen Vorgängen, der die Grundlage für die elektronentheoretische Vorstellung von dem Mechanismus der Fluoreszenz wie überhaupt aller Lumineszenzerscheinungen bildet (vgl. auch 3 b η).

Was den Zusammenhang von Fluoreszenz und chemischer Konstitution betrifft, so sind nach Meyer und Kauffmann besonders die aromatischen Verbindungen fluoreszenzfähig, vielleicht ist der Benzolkern Träger der Fluoreszenz („Fluorophor"), und gewisse Atomgruppen verschieben die Fluoreszenzbanden aus dem Ultravioletten ins Sichtbare; nach anderen Ansichten (Hewitt) existieren fluoreszierende Körper in zwei verschiedenen Zuständen — Tautomerie (Näheres vgl. bei Konen S. 1052 ff.). Jedenfalls ist neben der chemischen Zusammensetzung des gelösten Körpers auch die Natur des Lösungsmittels in vielen Fällen von Einfluß

auf die Fluoreszenz (vgl. die Kundtsche Regel für die Absorption im Artikel „Absorption. Lichtabsorption").

Von Bedeutung ist ferner die sensibilisierende Wirkung fluoreszierender Substanzen, d. h. ihre Fähigkeit photographische Platten für Licht bestimmter Farbe empfindlich zu machen (F. Vogel). Nach Starks Ansicht soll sogar die Sensibilisierung direkt durch das Fluoreszenzlicht der betreffenden Moleküle hervorgerufen werden. Medizinisch wichtig ist schließlich die Eigenschaft fluoreszierender Substanzen bei Belichtung auf Toxine und Protozöen zu wirken (Tappeiner u. a.).

η) Gase und Dämpfe. Die Fluoreszenz einer Reihe von Dämpfen zeigt wesentlich andere Eigenschaften als die Fluoreszenz von flüssigen und festen Körpern. Fällt nämlich helles weißes Licht auf bestimmte Dämpfe, so geht von ihnen ein farbiges Leuchten, ähnlich wie von Flammen oder elektrolumineszierenden Gasen aus, das spektral zerlegt aus einzelnen Linien oder in Linien auflösbaren Banden besteht. Das Spektrum der Fluoreszenz von Flüssigkeiten oder von festen Körpern dagegen zeigt fast stets Banden, die bisher wenigstens nicht in Linien auflösbar waren, sich also wie Teile eines kontinuierlichen Spektrums verhalten.

Man wird diesen Unterschied in der stärkeren Dämpfung der Schwingungen infolge der dichter gelagerten Moleküle zu suchen haben.

Die Fluoreszenz von Dämpfen, viel später als die gewöhnliche Fluoreszenz, von Lommel (1853) entdeckt, ist bisher vor allem von Wiedemann-Schmidt und R. W. Wood an Na-, K-, Ru-, J-, Hg- und Fl-dampf untersucht. Die auftretenden Erscheinungen sind äußerst kompliziert, versprechen aber, für unsere Vorstellung der Mechanik des Leuchtens von großer Bedeutung zu werden. So ergeben Woods Resultate der letzten Jahre an Na-Dampf folgendes: Erregung mit einer einzelnen Spektrallinie, die mit einer Absorptionslinie des Dampfes übereinstimmt, ruft eine bestimmte Serie von Fluoreszenzlinien hervor und eine Reihe anscheinend unregelmäßig gelagerter Linien (Resonanzspektrum; s. ~~die Abbildung im~~ Artikel „Spektroskopie"). Eine Ausnahme sollen die gelben D-Linien bilden: Erregt man mit Licht, das nur diese enthält, so zeigt auch das Fluoreszenzspektrum lediglich diese beiden Linien, ganz entsprechend der akustischen Resonanz einer Stimmgabel (s. 1b). Alle Serien- und Einzellinien zusammen, wie sie von jeder einzelnen erregenden Wellenlänge erzeugt werden, bilden das komplizierte Fluoreszenzspektrum, das bei Erregung mit weißem Licht entsteht. Der Zusammenhang zwischen Fluoreszenz- und Absorptionsspektrum, zwischen der Resonanzlinie und den gewöhnlichen Serienlinien, die teilweise Polarisation des Fluoreszenzlichtes und der störende Einfluß, den verschiedene Gase je nach ihren elektrischen Eigenschaften auf die Helligkeit des Fluoreszenzlichtes ausüben, sind großartige und für die Vorstellung des Leuchtprozesses grundlegende Resultate der Woodschen Versuche.

ϑ) Theorie. Die theoretischen Vorstellungen über die höchst verwickelten Erscheinungen der Fluoreszenz basieren auf dem Begriff der Resonanz. Diese allein aber ist nicht ausreichend, denn eine vollständige Theorie der Fluoreszenz müßte den Unterschied von Absorption ohne und Absorption mit Fluoreszenz darlegen und müßte erklären, wie bei der Fluoreszenz im allgemeinen auch andere als die absorbierten Wellenlängen ausgesandt werden. So ist die allein auf der Resonanzvorstellung aufgebaute Lommelsche Theorie unhaltbar: von theoretischen Schwierigkeiten abgesehen, verlangt diese Theorie Absorption fluoreszenzfähiger Substanzen an bestimmten Stellen im Ultrarot, die nicht aufgefunden werden konnte (G. C. Schmidt). Voigt nimmt zwar auch ein Mitschwingen an, und zwar von negativen Elektronen, die Fluoreszenzschwingungen sollen jedoch nicht direkt von ihnen ausgehen, sondern nur durch sie ausgelöst werden, da das Fluoreszenzlicht aus freien, inkohärenten Schwingungen besteht. Z. B. sollen infolge der Elektronenschwingungen einzelne Elektronen aus den Atomen austreten (lichtelektrischer Effekt) und hierbei oder während der Wiedervereinigung des Atoms mit dem Elektron soll das Fluoreszenzlicht ausgesandt werden; eine andere Vorstellung über die Auslösung des Fluoreszenzlichtes, die Voigt sogar vorzieht, ist die, daß sich das Molekül in zwei Zuständen befinden kann; in dem einen Zustand wird das Molekül in Resonanz versetzt, in dem anderen wird Fluoreszenzlicht ausgesendet. Neuerdings hat A. Einstein die Lichtquantenhypothese (vgl. den Artikel „Strahlungsumformungen") auch auf die Fluoreszenz angewandt — doch existiert heute eine befriedigende Theorie der Fluoreszenz noch nicht.

3b) Phosphoreszenz. α) Definition. Die Phosphoreszenz führt ihren Namen nach dem Leuchten des Phosphors im Dunkeln. Dieser und ähnliche mit Leuchten verbundene chemische Prozesse, wie Oxydation des Na und Ka, Nachleuchten von Gasen in Geißlerröhren, Fäulnis einiger Vegetabilien oder die sogenannte freiwillige Phosphoreszenz einiger Tiere werden heutzutage gewöhnlich nicht als Phosphoreszenz, sondern als Chemilumineszenz bezeichnet,

da das Leuchten als Begleiterscheinung einer nachweisbaren chemischen Umsetzung auftritt. Wir wollen hier unter Phosphoreszenz alle Erscheinungen verstehen, bei denen eine irgendwie — durch Belichten oder auf andere Weise — erregte Substanz auch nach Aufhören der Erregung noch Licht aussendet, aber in größerer Intensität als ein schwarzer Körper derselben Temperatur und ohne daß eine nachweisbare chemische Aenderung stattfindet. Eine phosphoreszierende Substanz leuchtet also nach und soll allein dadurch von einer fluoreszierenden unterschieden sein — eine strengere Trennung von Fluoreszenz und Phosphoreszenz ist wegen der Aehnlichkeit der Erscheinungen nicht möglich.

β) Phosphoroskop. Die einfachste Art Phosphoreszenz zu beobachten, besteht darin, die den Sonnenstrahlen ausgesetzte Substanz unmittelbar darauf im Dunklen zu betrachten. Diese Methode versagt aber offenbar dann, wenn die Substanz nur Bruchteile von Sekunden nachleuchtet. Unvergleichlich vollkommener ist deshalb das Phosphoroskop von E. Becquerel, der die Grundlage für die wissenschaftliche Untersuchung der Phosphoreszenz gelegt hat. Dieser sinnreiche Apparat erlaubt die Phosphoreszenz des untersuchten Körpers sehr kurze und beliebig veränderliche Zeit nach dem Belichten zu betrachten.

Der äußere Teil (s. Fig. 3) ist ein Kasten mit zwei gegenüberstehenden Oeffnungen C und C′ (letztere in der Fig. unsichtbar) zum Belichten

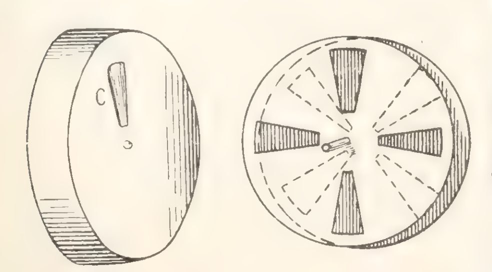


Fig. 3.

und zum Beobachten. Darinnen sind auf einer Achse zwei Scheiben befestigt, die je eine Reihe gleicher Oeffnungen ebenso groß wie C und C′ besitzen. Diese Oeffnungen sind aber gegeneinander verrückt und zwischen den Scheiben befindet sich die zu belichtende Substanz, so daß diese bei rascher Drehung der Scheiben abwechselnd durch C belichtet wird und ihr Phosphoreszenzlicht durch C′ ins Auge des Beobachters sendet.

Mit diesem Apparat fand Becquerel, daß die Phosphoreszenz eine viel allgemeinere Eigenschaft ist, als man früher angenommen hatte. Als Phosphore bekannt waren schon seit Jahrhunderten eine große Zahl natürlicher und künstlicher Minerale („Leuchtsteine", „Lichtsauger"), wie Diamant, Flußspat (als Chlorophan), und Schwefelverbindungen alkalischer Erden — entdeckt wurde die Phosphoreszenz um 1600 von einem Schuhmacher Casciorolus, übrigens spricht schon Plinius von selbstleuchtenden Steinen. Becquerel entdeckte nun viele neue phosphoreszierende Substanzen, doch hat ihre Zusammenstellung keinen Sinn. Denn nach neueren Untersuchungen geben ganz reine Substanzen keine Phosphoreszenz, sehr geringe Beimengungen aber genügen bisweilen Phosphoreszenz zu erzeugen und bedingen z. B. die großen Unterschiede in der Farbe der Phosphoreszenz des Schwefelkalziums, wenn dieses durch Zusammenschmelzen des Schwefels mit verschiedenen Kalkarten erhalten wird. So ist die Phosphoreszenz für manche Substanzen ein äußerst empfindliches analytisches Mittel, das Euorpium wurde z. B. durch Phosphoreszenzuntersuchungen entdeckt. Allgemein sind phosphoreszierende Körper als feste Lösungen zu betrachten. Sie entstehen nach Lenard und Klatt durch Zusammenschmelzen eines Metalles und eines schmelzbaren Zusatzes mit einem Erdalkalisulphat (z. B. mit 1 Teil Ca etwa 0,0001 Teil Metall wie Cu, Pb, Mn — und vielleicht 0,01 Teil Na, K oder Li-Salz als Zusatz).

Bei einer großen Zahl von Metallen und seltenen Erden (wie Sa, Dy, Tb, Er, Nd, Pr) ist es gelungen, die ihnen charakteristischen Phosphoreszenzbanden aufzufinden, die man bei spektraler Zerlegung des Phosphoreszenzlichtes wahrnimmt. Bei gleichzeitiger Anwesenheit verschiedener Zusätze treten alle entsprechenden Banden nebeneinander auf; in verschiedenen Lösungsmitteln zeigen sich kleine Unterschiede, ohne daß jedoch der Spektralcharakter geändert wird.

γ) Erregung durch Kathoden- und andere Strahlen. Viele der besprochenen Tatsachen wurden bei Erregung der Phosphoreszenz durch Kathodenstrahlen gefunden (Kathodophosphoreszenz). Außer durch Belichten und durch Kathodenstrahlen wird die Phosphoreszenz auch durch Kanal-, Anoden-, Röntgen- und Radiumstrahlen hervorgerufen, ferner durch mechanische Mittel wie Brechen, Stoßen usw. (sogenannte Tribophosphoreszenz), zu denen man auch Vorgänge bei der Kristallisation rechnen muß, da diese Lichterregung vermutlich durch ein Brechen oder Springen der Kristalle entsteht.

Kathodenstrahlen sind äußerst wirksam. Manche Substanzen, von ihnen erregt, phosphoreszieren so stark, daß sie einen dunklen Raum merklich erhellen und als Phosphoreszenzlampen bezeichnet werden können. Einzelne

Körper leuchten hierbei nicht merklich nach, weshalb diese Erscheinung häufig auch als Fluroreszenz bezeichnet wird. Die Phosphoreszenz eines Bariumplatinzyanürschirms unter der Wirkung der Röntgenstrahlen hat die Entdeckung dieser Strahlen ermöglicht. Derartige Schirme werden auch heute zur Demonstration und zu medizinischen Untersuchungen viel verwandt. Zu wissenschaftlichen Untersuchungen der Kathoden-, Röntgenstrahlen und in der Praxis wird häufig auch Balmainsche Leuchtfarbe benutzt, die aus Schwefelkalzium mit verschiedenen Metallzusätzen besteht. Das an Zinkblende durch Radiumstrahlen hervorgerufene Funkeln, Szintillieren genannt, rührt vom Aufprallen der α-Strahlen her (deshalb wohl eine Tribo-Phosphoreszenz) und ist kürzlich mit großem Erfolg zur Zählung der pro Sekunde auffallenden α-Teilchen und zur Messung ihrer Ladung benutzt worden. Auch die β- und γ-Strahlen von Radium erzeugen Phosphoreszenz, da sie ihrer Natur nach identisch mit den Kathoden- bezw. Röntgenstrahlen sind. Das sogenannte Selbstleuchten der Radiumsalze beruht auf einem schwachen Leuchten der umgebenden Luft unter dem Einfluß der vom Radium ausgehenden Strahlen und ist als Gaslumineszenz in früher besprochenem Sinne zu betrachten.

δ) Temperatureinfluß. Die sogenannte Thermophosphoreszenz, das Leuchten bei geringer Temperaturerhöhung, beruht auf einer eigenartigen Temperaturabhängigkeit der Phosphoreszenz und entsteht nicht infolge von Erhitzen, da dieselbe Substanz wiederholt erhitzt ihre Phosphoreszenzfähigkeit verliert. Vielmehr ist vorhergehendes Belichten („Insolation“) als Ursache des Leuchtens anzusehen, und die aufgespeicherte Lichtmenge wird von der betreffenden Substanz bei niederer Temperatur sehr langsam, bei manchen Körpern ganz unsichtbar, bei höherer Temperatur schneller abgegeben.

Dieselbe Eigenschaft besitzen offenbar alle Substanzen, deren Phosphoreszenz bei höherer Temperatur in Fluoreszenz oder diejenigen, deren Fluoreszenz bei tieferer Temperatur in Phosphoreszenz übergeht (s. 3bη). Hand in Hand mit der Phosphoreszenz z. B. des Flußspats bei Erhitzung geht seine Entfärbung; die bei zu starker Erhitzung verschwindende Phosphoreszenz sowohl wie die Farbe erhält der Flußspat z. B. durch elektrische Entladungen zurück. Diese Erscheinung ist vielleicht eine direkte elektrische Wirkung, indem Elektronen ausgelöst werden. Im übrigen beruht die Phosphoreszenzerregung durch den elektrischen Funken hauptsächlich auf der Wirkung des von ihm ausgehenden Lichtes, das besonders reich an ultravioletten Strahlen ist.

ε) Spektrale Untersuchung. Denn die spektrale Untersuchung des erregenden und des erregten Lichtes (von Becquerel zuerst vorgenommen) zeigt, daß bei der Phosphoreszenz ebenso wie bei der Fluoreszenz, hauptsächlich violettes und ultraviolettes Licht, also auch die an ultravioletten Strahlen reichen Lichtquellen wirksam sind und daß das Phosphoreszenzlicht im allgemeinen längere Wellen als das erregende enthält (das Stokessche Gesetz scheint bei der Phosphoreszenz streng gültig zu sein). Wirksam sind, wie bei Fluoreszenz nur die absorbierten Strahlen. Phosphoreszenz ist also als Wiederausgabe einer gewissen Menge des bei der Belichtung absorbierten Lichtes zu betrachten. Zu Versuchen entwirft man — wie bei der Fluoreszenz — ein horizontales möglichst linienförmiges Spektrum auf der zu untersuchenden Substanz und zerlegt das Phosphoreszenzlicht durch ein zweites „gekreuztes“ Prisma (s. 3aγ), d. h. ein Prisma, dessen brechende Kante parallel der Lichtlinie auf der Substanz ist. So kann man das von verschiedenen Wellenlängen erregte Phosphoreszenzlicht spektral untersuchen. Im allgemeinen besteht das so erhaltene Phosphoreszenzspektrum aus „Banden“, die jedoch z. T. bei tiefer Temperatur in einzelne Linien auflösbar sind. Dies ist besonders interessant, weil die Absorptionsbanden derselben Substanzen ein ganz ähnliches Verhalten zeigen.

Von großer Bedeutung für unsere Kenntnis der Phosphoreszenz ist die Untersuchung der Phosphoreszenz im Ultravioletten und Ultraroten, die erst in jüngster Zeit geglückt ist. Im Gegensatz zu den violetten und ultravioletten Strahlen wirken die roten und ultraroten auslöschend auf die Phosphoreszenz, nachdem sie dieselbe zuerst für kurze Zeit verstärkt haben. So kann man die Phosphoreszenz zur Bestimmung der Lage von Fluoreszenzlinien im Ultrarot benutzen. Freilich werden die Linien unscharf, da die von einer Stelle der phosphoreszierenden Schicht ausgehenden Strahlen stets die Nachbarstellen miterregen.

ζ) Zeitlicher Verlauf. Der zeitliche Verlauf der Phosphoreszenz ist im allgemeinen äußerst kompliziert. Die Helligkeit des Phosphoreszenzlichtes wächst proportional der Erregungsintensität, solange diese nicht zu groß ist; dann jedoch langsamer und scheint eine Art Sättigung zu erreichen, bei welcher sich die durch die Erregung hervorgerufene Änderung im phosphoreszierenden Körper und die Rückwandlung das Gleichgewicht halten. Nach Aufhören der Erregung wird das Phosphoreszenzlicht allmählich dunkler, die Dauer der Lichtaussendung aber liegt bei den verschiedenen Substanzen zwischen kleinen Bruchteilen einer Sekunde und einer großen Zahl von Stunden. Dieses „Abklingen“ der Phosphoreszenz geht bei manchen Sub-

stanzen nach einem Exponentialgesetz vor sich, eine allgemein gültige Formel ist allerdings bisher nicht aufgefunden worden. Vielfach zeigen verschiedene Banden bei derselben Substanz (die aber vermutlich auch entsprechend verschiedene Zusätze enthält) ein verschiedenes zeitliches Verhalten. Außerdem übt Temperatur und Wellenlänge des erregenden Lichtes einen verschiedenen Einfluß auf das Abklingen aus. Lenard und Klatt unterscheiden drei Zustände: Bei tiefer Temperatur klingt jede Bande sehr schnell ab („Kälte-" oder „unterer Momentzustand"); bei einer für jede Bande bestimmten höheren Temperatur hält das Leuchten viel länger an („Dauerzustand"), um bei noch höherer Temperatur wieder schnell abzuklingen („Hitze-" oder „oberer Momentzustand"). Findet die Erregung bei gleichen Temperaturen statt, so lagert sich über diese Erscheinung die in 3b δ erwähnte Abhängigkeit de Aufspeicherung von der Temperatur. Nach den neuesten Untersuchungen von Kowalski lagern sich bei längerer Exposition über die breiten Phosphoreszenzbanden langsam — manchmal dauert es bis 100 sec — feine Linien, deren Intensität von der Intensität der Lichtquelle, der Temperatur, dem bestrahlten Stoffe und der Lage im Spektrum abhängt („Progressive Phosphoreszenz").

Ein Beispiel zeige, wie kompliziert selbst in einem relativ einfachen Fall die Phosphoreszenzerscheinungen sind. Folgende Kurven (Fig. 4) einer Arbeit von Lenard und Klatt entnommen, geben die verschiedene Wirksamkeit des erregenden Lichtes verschiedener Wellenlängen bei Strontiumsulphid mit Zink. Je höher die Kurven an einer bestimmten Stelle sind, um so heller ist das durch Licht dieser Wellenlänge erregte Phosphoreszenzlicht. Die schraffierten Kurven geben die betreffende erregte Phosphoreszenzbande bei günstigster Erregung, die Teile α, β, γ entsprechen verschiedenen Zuständen; α erscheint bei gewöhnlicher Temperatur, δ nur bei 100° und β am besten bei — 45° und $CaFl_2$-Zusatz, α und β sind „Kältebanden" (K), δ „Hitzebande" (H).

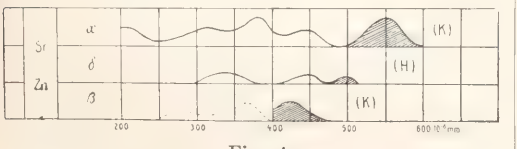


Fig. 4.

η) Erklärungsversuche. Alle Erklärungsversuche der Phosphoreszenz haben die Vorstellung gemein, daß infolge der Erregung der Substanz eine stabilere Form (A) unter Energieaufnahme in eine labilere (B) übergeht. Die Rückwandlung in die Form A geht unter Energieabgabe — Leuchten — vor sich, die ihr entgegenwirkenden Widerstände hängen von der Temperatur ab. Während die älteren Theorien von isomeren Modifikationen und veränderten Molekularformen sprechen, nehmen die neueren Vorstellungen Elektronenvorgänge zu Hilfe, wobei allerdings die auslöschende Wirkung der ultraroten Strahlen schwer verständlich bleibt. Die lichtelektrische Empfindlichkeit der Phosphore legt die Ansicht nahe, daß die Erregung — nicht nur durch Licht, sondern auch durch Röntgen- oder Kathodenstrahlen usw., vermutlich auch die Erregung durch mechanische Mittel — einen Austritt von Elektronen aus dem Atom bewirkt und daß wieder bei der Rückkehr der Elektronen zum Atom die Lichtschwingungen ausgesandt werden — eine Ansicht, die zuerst von E. Wiedemann und G. C. Schmidt zur Erklärung der Fluoreszenz und Phosphoreszenz ausgesprochen, neuerdings von Lenard (1909) weiter entwickelt worden ist. Wenn auch von einer abgeschlossenen Theorie noch keine Rede ist, so scheint der angedeutete Weg doch sehr aussichtsreich; denn er führt gleichzeitig zur Erklärung der Fluoreszenz und zu der der Phosphoreszenz. Freilich sehen manche auch heute noch Fluoreszenz und Phosphoreszenz als im Grunde verschiedene Erscheinungen an, da fluoreszenzfähig nur eine Substanz mit „fluorophoren" Atomgruppen sei, zur Phosphoreszenz jedoch Mischung zweier oder mehrerer Substanzen notwendig zu sein scheine. Aber abgesehen von den zahlreichen aufgeführten übereinstimmenden Eigenschaften sind alle phosphoreszierenden Körper auch fluoreszierend, da die Phosphoreszenz unmittelbar mit der Bestrahlung einsetzt. Außerdem kann man einzelne fluoreszierende Flüssigkeiten (Eosin, Fluorescein u. a.) durch Zusatz von Gelatine in phosphoreszierende überführen und ähnliches allein durch Temperaturänderung bewirken.

Literatur. *Zusammenfassende Arbeiten:* ***H. Kayser****, Handbuch der Spektroskopie. Besonders Bd. II, IV (Fl. u. Ph. bearbeitet von H. Konen), und V.* — ***R. Ladenburg****, Ueber die Absorption leuchtender Gase. Jahrbuch der Radioakt. u. Elektronik 1912.* — *Abhandlungen: Zu 1a)* ***E. Wiedemann****, Fluoreszenz und Phosphoreszenz. Wied. Ann. 1888. Festschrift, Erlangen 1901.* ***G. Kirchhoff****, Ueber den Zusammenhang zwischen Emission und Absorption von Licht und Wärme. Sitzungsb. d. Kgl. Pr. Akad. d. Wiss. 1859 bis 1862. Zu 1b)* ***E. Pringsheim****, Das Kirchhoffsche Gesetz und die Strahlung der Gase. Wied. Ann. 1892.* — ***Derselbe****, L'émission des gaz. Rapp. prés. au Congr. Intern. de phys. à Paris II, 1900.* — ***M. Planck****, Sitzungsber. d. Kgl. Pr. Ak. d. Wiss. 1902 bis 1905.* — ***H. A. Lorentz****, On the absorption and emission of spectral lines. Amst. Proc. 1906.* — *Zu 2a α)* ***R. Ladenburg und F. Reiche****, Ueber selektive Absorption. Verh. d. Schles. Ges. 1912.* — *Zu 2b α)* ***H. Des-***

landres, C. R. 1885 bis 1888. — Zu 2bβ) **J. R. Rydberg**, *Zs. f. phys. Chem. 1890 u. a. O.* — **H. Kayser und C. Runge**, *Sitzungsber. d. Kgl. Pr. Akad. d. Wiss. 1889 bis 1894.* — **W. Ritz**, *Zur Theorie der Serienspektren. Ann. der Phys. 1903 und 1908. — Zu 2bγ)* **P. Lenard**, *Ueber die Zentren der Lichtemission der Alkalidämpfc und -Salze. Ann. d. Phys. 1905.* — **J. Stark**, *Ann. d. Phys. 1904, 1907 usw. — Zu 3aα)* **G. G. Stokes**, *Philos. Trans. 1852 bis 1854. — Zu 3aγ)* **E. L. Nichols und E. Merrit**, *Studies in Luminescence. Phys. Rev. 1904 ff. — Zu 3aζ)* **G. C. Schmidt**, *Beziehung zwischen Fluoreszenz und Aktinoelektrizität. Wied. Ann. 1898.* — **J. Stark und W. Steubing**, *Fluoreszenz und lichtelektrische Empfindlichkeit. Phys. Zs. 1908.* — **R. Meyer**, *Fluoreszenz und chemische Konstitution. Ber. d. D. chem. Ges. 1898.* — **R. Kauffmann**, *Ringsystem des Benzols. Ber. d. D. chem. Ges. 1900.* — **E. Vogel**, *Lage der Absorptionsstreifen und lichtelektrische Empfindlichkeit organischer Farbstoffe, Wied. Ann. 1891.* — **Tappeiner**, *D. Arch. f. klin. Med. 1906 ff. — Zu 3aη)* **R. W. Wood**, *Phil. Mag. 1905 bis 1911. — Zu 3aϑ)* **G. C. Schmidt**, *Ueber Fluoreszenz. Wied. Ann. 1896. — Zu 3bβ)* **E. Becquerel**, *Phosphoreszenz. Ann. chim. et phys. 1839 bis 1877.* — **Lecoq de Boibaudran**, *C. R. 1886 bis 1888.* — **H. Muthmann und E. Bauer**, *Ber. d. D. chem. Ges. 1900 bis 1901.* — **P. Lenard und V. Klatt**, *Ueber die Phosphoreszenz der Erdalkaliphosphore. Ann. d. Phys. 1904.* — **P. Lenard**, *Ann. d. Phys. 1909, 1910.* — **P. Waentig**, *Zs. f. phys. Ch. 1905.* — **G. Urbain**, *Soc. franz. de phys. 1906. — Zu 3bγ)* **W. Crookes**, *Proc. R. Soc. 1879 bis 1885. — Zu 3bε)* **H. Becquerel**, *C. R. 1907.* — **J. Becquerel**, *C. R. 1906/07. — Zu 3bξ)* **J. de Kowalski**, *Progressive Phosphoreszenz bei tiefer Temperatur. C. R. 1910. — Zu 3bη)* **E. Wiedemann und G. C. Schmidt**, *Wied. Ann. 1898.* — **P. Lenard**, *Lichtemission und deren Erregung. Ann. d. Phys. 1909.*

R. Ladenburg.

Lurchtiere.

Die durch Kiemenatmung in der Jugend, durch Lungenatmung im ausgewachsenen Zustand, sowie durch das Leben im Wasser und auf dem Lande ausgezeichnete Abteilung der Wirbeltiere, die in dem Artikel „Amphibia" behandelt wird.

Lyell

Charles.

Er ist am 14. November 1797 zu Kinnordy in Forfarshire (Schottland) als Sohn eines reichen Gutsbesitzers geboren worden. Er besuchte die Schule in Ringwood und Salesburg, studierte dann seit 1816 in Oxford die Rechte, widmete sich daneben aber auch dem Studium der Naturwissenschaften, besonders der Geologie. Als er sich 1819 in London als Anwalt niederließ, wurde er bald Mitglied der Geologischen Gesellschaft und 1823 Sekretär derselben. 1831 übernahm er eine Professur für Geologie am King's College, 1848 wurde ihm die Ritterwürde verliehen, 1864 wurde er zum Baronet ernannt. Großes Aufsehen und später ungeteilten Beifall erregte das Werk, mit dem er seine wirksame geologische Tätigkeit begann Principles of Geology. Darin trat er der damals herrschenden Katastrophentheorie Cuviers entgegen und zeigte in scharfsinniger Weise, daß alle gegenwärtig zu beobachtenden geologischen Vorgänge vollkommen ausreichten, um den Bau der festen Erdkruste zu erklären, eine Anschauung, die bereits v. Hoff in Deutschland ausgesprochen hatte, ohne irgendwelche Beachtung zu finden, die Lyell aber durch zahlreiche unwiderlegliche Beweise derart stützte, daß sie bald die allein herrschende wurde. An dieses die moderne Geologie begründende Werk schlossen sich 1837 die Elements of Geology an. Zahlreiche Reisen, die er meist in Begleitung seiner Gattin Mary, einer Tochter des Geologen Leonhard Horner, ausführte, ließen ihn die aufgestellten Grundsätze in jeder Hinsicht prüfen. Das Ergebnis seiner Reisen in Nordamerika veröffentlichte er in den Travels in North America with geological observations (1846). In seinem letzten Werk Geological evidences of the antiquity of man (1863) versuchte er zu zeigen, daß das Alter des Menschengeschlechtes sehr weit über die gewöhnliche Annahme zurückreiche. Nach seinem Tode am 22. Februar des Jahres 1875 wurde er in der englischen Ruhmeshalle in der Westminster-Abtei in London beigesetzt.

Literatur. **T. G. Bonney**, *Charles Lyell and modern Geology, London 1895. — Life, letters and journals of Sir* **Charles Lyell** *Bart. Edited by his Sister in law Mrs. Lyell 2 vol. London 1881.*

O. Marschall.

Lymphe.

1. Allgemeines. 2. Morphologie des Lymphsystems. 3. Chemie der Lymphe. 4. Die Bildung der Lymphe. 5. Bildung von lymphatischen Flüssigkeiten. 6. Zirkulationsmechanik der Lymphe.

1. Allgemeines. Sobald ein Organismus nicht mehr einzellig ist, sondern aus einem Komplex von Zellen besteht, bedarf es eines in besonderen Kanälen verlaufenden Flüssigkeitssystemes, um den einzelnen Zellen die Stoffe, deren sie bedürfen, zuzuführen, und diejenigen, welche von ihnen als Schlacken oder sonstwie als entbehrlich abgegeben werden, zu entfernen. So entstand das Blut führende Kreislaufsystem mit seinen vielen Hilfsapparaten. Von den niedersten Wirbeltieren ab, mit Ausnahme des Amphioxus, findet sich aber ein zweites Flüssigkeitssystem, das Lymphsystem. Schon durch diesen morphologischen Gesichtspunkt des späten Auftretens erweist sich das Lymph-

system als ein Apparat, der voraussichtlich eine größere Verwickelung des Stoffaustausches bedingt und einen feiner geregelten Mechanismus des stofflichen Geschehens gewährleistet.

2. Morphologie des Lymphsystems. Ganz allgemein gesprochen ist das Lymphsystem ein reich verzweigtes System von Flüssigkeitsräumen, die mit Kanälchen und Spalten, die sich zwischen die Blutgefäße und die Zellen einschieben, beginnen, dann übergehen in abführende kleine Lymphgefäße, welche schließlich nach ihrer Sammlung in ein letztes größeres Gefäß an einer bestimmten Stelle in den venösen Kreislauf einmünden. Die einzelnen Organe sind so dicht allseitig von Lymphspalten und Gefäßen durchsetzt, daß bei einigen Organen eine vollständige und ausschließliche Darstellung ihres Lymphapparates, durch Injektion der Gefäße und Entfernung aller übrigen Teile, ein getreues Abbild des betreffenden Organes geben würde.

Das Hauptinteresse fordert die Kenntnis der ersten Anfänge des Lymphsystems in den Geweben, und wir begegnen bei dem Versuch der Feststellung des tatsächlichen Verhaltens, welches von prinzipieller Bedeutung ist, einigen noch ungelösten Schwierigkeiten. Eine Tatsache ist sicher und funktionell von großer Bedeutung, nämlich die, daß nirgends eine direkte Berührung zwischen Blutgefäßen und Zellen stattfindet, vielmehr sich stets als Zwischenglied die Lymphspalte einschiebt. In besonderem Maße gilt dies von den Stätten ausgiebigster Zelltätigkeit, von den Drüsenzellen und den Nervenzellen. Weniger geklärt ist die Sachlage bei den Muskel- und Bindegewebszellen. Das Blut sowohl wie die Gewebszellen geben demnach ihre Stoffe primär an die Lymphspalten ab, diese sind die Vermittler des Stoffaustausches.

In betreff der ersten Anfänge nun der Lymphwege in den Gewebsspalten ist es, infolge der technischen Schwierigkeiten bei der Darstellung dieser zarten Gebilde, noch nicht möglich gewesen zu entscheiden, ob dieselben offen in den Räumen um die Zellen endigen oder beginnen oder ob die letzten und feinsten Lymphwege abgeschlossen gegen die Gewebsspalten um die Zellen ihren Anfang nehmen. Eine große Anzahl genauer Beobachtungen der letzten Jahre scheint mehr für die letztere Auffassung zu sprechen. Die sichere Entscheidung hierüber ist der anatomischen Untersuchung vorbehalten, aber es ist nicht unwesentlich, daß Erfahrungen über die Funktion der Lymphe und den Mechanismus ihrer Bildung die morphologische Trennung von feinsten und letzten Lymphwegen und von Räumen, die wir als Gewebsspalten bezeichnen wollen, sehr glaubhaft machen. Diese Trennung zwischen Lymphspalten und Gewebsspalten findet durch eine äußerst dünne Membran statt, die aus ganz flachen Endothelzellen einfachster Struktur besteht. Es ist ganz klar, daß beim Eintreiben einer Injektionsflüssigkeit in ein Gewebe, um die Abgrenzung des Lymphgefäßsystems künstlich darzustellen, selbst ein geringer Druck die feinen Membranen sprengen kann.

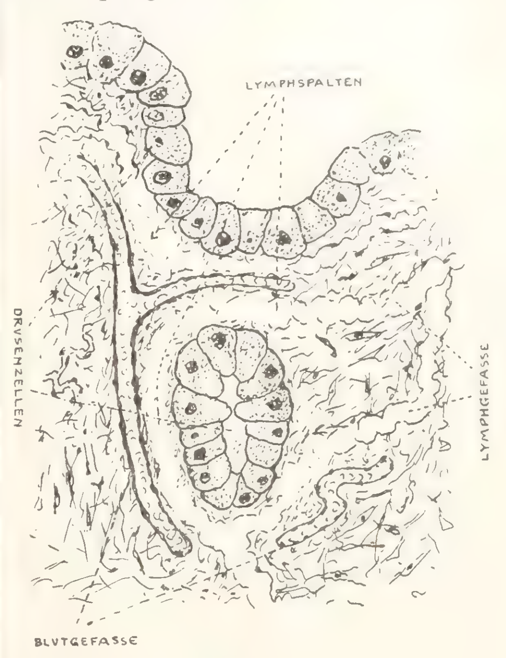


Fig. 1.

Da man mit guten Gründen dazu gelangt ist, die Anfänge der Lymphbahnen von den Gewebsspalten als abgeschlossen zu erachten, ist es nötig, auch eine Unterscheidung der Flüssigkeiten, welche sich in den getrennten Raumsystemen befinden, vorzunehmen. Demgemäß unterscheidet man zwischen Lymphe im eigentlichen Sinne des Wortes und der Gewebsflüssigkeit. Die letztere, die Gewebsflüssigkeit, ist diejenige, welche, die Zellen direkt umspült und von den Blut- wie den Lymphkapillaren durch eigene Membranen geschieden ist. Mögen diese noch so fein sein, ihre bloße Existenz, die Tatsache, daß sie aus Bausteinen lebendigen Materiales zusammengesetzt sind, legt den Gedanken nahe, daß sie berufen seien, Sitz von aktiven Vorgängen zu sein. Auch lehrt uns die physikalische Chemie, wie vielgestaltig kolloide Membranen — denn um kolloide Membranen handelt es sich hierbei — in den Austauschprozeß zwischen zwei Flüssigkeiten, zwischen welche sie eingeschaltet sind, einzugreifen vermögen. Selbst

wenn von vitalen Eigenschaften dieser Membranen abgesehen würde, bleiben noch hinreichende Kräftewirkungen übrig, die zu berücksichtigen sind. Die Gewebsflüssigkeit empfängt die Stoffe aus dem Blute und gibt sie an die Zellen ab; sie ist es aber auch wiederum, die Stoffe an die Lymphe abgibt, und auch an das Blut. Es muß nun Mittel geben, durch die geregelt wird, ob überhaupt ein Uebertritt in der einen oder der anderen Richtung geschieht und welche Stoffe in das eine, welche in das andere System gelangen. So eröffnet sich durch morphologische und funktionelle Erwägungen eine große Reihe von Möglichkeiten, bei einem scheinbar einfachen Stoffaustauschprozeß.

Der Name „Lymphe" wäre zureservieren für diejenige Flüssigkeit, welche in wohlcharakterisierten Lymphgefäßen kleineren und größeren Kalibers fließt und schließlich in das Blut wieder einmündet. Vor dieser Einmündung durchläuft aber jede Lymphe — und hier kommt ein neues morphologisches Moment von funktioneller Bedeutung hinzu — die sogenannten Lymphdrüsen.

Die Lymphdrüsen sind Gebilde variabler Größe (die Dimensionen schwanken zwischen der Größe von Reiskörnern und größeren Erbsen, doch gibt es je nach der Tierart und dem Zustande auch Größen darunter und darüber); sie werden von einer Bindegewebskapsel umhüllt, welche Scheiden in das Innere hineinsendet. Das Innere der Lymphdrüsen wird von einer Art Zellen erfüllt, welche lymphoide Zellen genannt werden. Es sind das Zellen ganz anderer Art als die epithelialen Zellen der spezifischen absondernden Drüsen, sowohl ihrem Bau, wie ihrer entwickelungsgeschichtlichen Abstammung nach. Es sind dieselben Zellen wie sie als weiße Blutkörperchen im kreisenden Blute angetroffen werden, wobei allerdings die Einschränkung gemacht werden muß, daß nicht alle weißen Blutkörperchen, sondern nur die als Lymphocyten bezeichnete Art wesensgleich mit den Lymphdrüsenzellen sind und aus den Lymphdrüsen auch wirklich herstammen, aus denen sie durch den Lymphstrom ausgespült werden. Lymphgefäße treten als „zuführende" an den äußeren Rand der Lymphdrüse heran und verlassen als abführende den entgegengesetzten Rand der Drüse. Entwickelungsgeschichtlich stammen die Lymphdrüsen vom Mesoblast. Die Lymphdrüsen werden auch mit einer Arterie und einer Vene versorgt. Die nähere Untersuchung ergibt, daß im Innern die Lymphdrüsen in eine Rinden- und Markschicht zerfallen. In der Rindenschicht kommen eigentümliche Gebilde, dicht konzentrisch angeordnete Kugelschalen von Lymphzellen, vor, welche Keimzentren genannt werden. Diese Keimzentren sind Stätten lebhafter Bildungstätigkeit von neuen Lymphzellen, und zwar finden sich die großen neu gebildeten und in Bildung begriffenen Zellen mit deutlichen Kernteilungsfiguren in der Mitte des Keimzentrums. Die Markschicht besteht aus mehr locker gefügten Strängen von Lymphzellen. Die Lymphe umspült zunächst die Gebilde der Rindenschicht und sickert dann durch ein weites und reich verzweigtes Maschennetz von Lymphspalten durch den Markraum nach den abführenden Lymphgefäßen zu. Außerdem ist die Lymphdrüse mit Blutgefäßen versorgt.

Je jünger ein Tier, je kräftiger, je reger die Stoffwechseltätigkeit desselben ist, um so größer ist die Ausbildung der Lymphdrüsen. Auch ist in der Umgebung von Drüsen jeglicher Art die Entwickelung von Lymphdrüsen am stärksten, während bei den wesentlich aus Muskeln und Skeletteilen bestehenden Extremitäten nur an den Gelenkbeugen eine Anhäufung von Lymphdrüsen sich findet. Alle diese Tatsachen weisen darauf hin, daß die Lymphdrüsen mit der Stoffwechseltätigkeit der Gewebe in einem gewissen Zusammenhange stehen müssen. Vor allem aber regt die Tatsache, daß alle Lymphe, ehe sie in das Blut zurückkehrt, zwangsweise Lymphdrüsen passieren muß, und zwar aus Gründen, die sich später ergeben werden, nur relativ langsam, zu der Vorstellung an, daß hierin ein Sinn liege, der im Zusammenhang mit den Eigenschaften der Lymphe und der Funktion des Lymphsystems stehen müsse. Die alte Vorstellung von den Lymphdrüsen als einem Filter, wenn der Begriff Filter erweitert wird von dem eines bloß passiv mechanisch wirkenden Apparates zu einem solchen mit regen chemischen Umsetzungen, leitet ungezwungen zu folgender Auffassung, die im Einklang mit den bis jetzt geschilderten Tatsachen steht. Die Lymphe entsteht als ein Produkt der Tätigkeit der Organe, insbesondere der drüsigen, aber nicht ausschließlich derselben. Infolge hiervon enthält sie Stoffwechselprodukte, die zum Teil nicht unverändert, zum Teil wenigstens nur langsam auf dem Wege des Kreislaufs in den Organismus zurückkehren dürfen. Die Umwandlung der genannten, zunächst hypothetischen Produkte geschieht in den Lymphdrüsen. Eine sehr auffallende morphologische Tatsache beleuchtet klar die innige Beziehung zwischen der Lymphdrüsenfunktion und der einströmenden Lymphe. Wenn der Zu- und Abfluß der Lymphe zu einer Lymphdrüse aufgehoben wird, unter unveränderter Erhaltung ihrer Blutversorgung, so nimmt der Umfang des Gebildes ab und die Zahl der Kernteilungsfiguren, die ja ein Ausdruck

intensiven Zellgetriebes sind, vermindert sich außerordentlich: demnach enthält die einströmende Lymphe dasjenige Moment, welches den Antrieb für die morphologisch erkennbaren Leistungen der Lymphdrüsen abgibt.

Von den Anatomen werden noch eine Reihe von Räumen und die in ihnen enthaltene Flüssigkeit zu dem Lymphsystem gerechnet; es sind dies die Hohlräume, die sich an der Außenfläche der Lunge, des Herzens, der Darmeingeweide, des Hirns, und als Innenräume in den Gelenkhöhlen befinden, Höhlen, denen der gemeinschaftliche Name seröse Höhlen gegeben wird, weil sie von einer als Serosa bezeichneten dünnen Membran von Endothelzellen ausgekleidet sind. Vom funktionellen Standpunkte aus wird man aber eine Unterscheidung machen zwischen der Austauschflüssigkeit, zwischen Blut- und Gewebszellen und dem Inhalt der genannten Hohlräume.

3. Chemie der Lymphe. Die chemische Zusammensetzung der Lymphe sowie ihre sonstige Beschaffenheit wird meist an der Flüssigkeit untersucht, die man aus einer Fistel des in das venöse Blut einmündenden Hauptlymphstammes, Ductus thoracicus oder Brustgang genannt, gewinnt. Zunächst enthält sie an Formelement weiße und spärliche rote Blutkörperchen. An festen Bestandteilen, welche zwischen 4 bis 9 % ausmachen, enthält die Lymphe Eiweißkörper, Fett, Zucker, Extraktivstoffe, und Salze. Die Eiweißkörper sind dieselben wie diejenigen des Blutes, nämlich Serumalbumin, Serumglobulin und Fibrinogen. Die Mengenverhältnisse sind allerdings andere wie im Blute, indem in der Lymphe der Gehalt an Eiweißkörpern 3 bis 4 %, im Blutplasma aber 6 bis 8 % beträgt. Hingegen ist das Verhältnis von Globulin zu Albumin das gleiche wie im Blute.

Mit dem Gehalt an Fibrinogen steht im Zusammenhange, daß die Lymphe außerhalb des Körpers gerinnt. Wie im Blute findet sich in der Lymphe das Gerinnung erzeugende Ferment Thrombin in einer Vorstufe, die sich außerhalb des Körpers in das Ferment umwandelt. Durch seine Einwirkung auf das Fibrinogen entsteht der Faserstoff Fibrin, welcher farblose, weiche Gerinnsel bildet.

Der Fettgehalt der Lymphe aus dem Brustgang ist wechselnd. Befindet sich das lymphspendende Tier im Zustande der Verdauung einer fettreichen Nahrung, so ist die ausfließende Lymphe eine milchig trübe Flüssigkeit. Auf der Höhe der Verdauung kann der Fettgehalt 2½ bis zu 6 % betragen, woraus folgt, daß jedenfalls ein Teil des in den Darm gebrachten Fettes in der Darmschleimhaut von den Lymphwegen aufgenommen wird und so in den Brustgang gelangt. Im nüchternen Zustand ist der Fettgehalt sehr gering.

Der Gehalt an Traubenzucker und Extraktivstoffen unterscheidet sich in seinen Mengenverhältnissen nicht wesentlich von denjenigen des Blutes; nur der Harnstoffgehalt ist etwas größer. Was die anorganischen Salze anlangt, so ergibt die genauere Analyse zwar geringfügige, aber doch nicht zu vernachlässigende Unterschiede gegenüber dem Blutplasma. Namentlich gilt dies vom Kochsalz, dessen Konzentration stets ein wenig höher ist. Es mag sein, daß die oft behauptete sonstige scheinbare Gleichheit in der Zusammensetzung von Blut und Lymphe auf der nicht genügenden Schärfe unserer analytischen Methoden beruht.

Uebrigens lehren auch physikalisch-chemische Methoden einen Unterschied in der Zusammensetzung von Lymphe und Blut. Die Gefrierpunktsbestimmung ergibt, daß der Gefrierpunkt der Lymphe ein wenig tiefer ist als der des Blutes. Da die Gefrierpunktserniedrigung von der Zahl der aufgelösten Bestandteile abhängig ist, besagt diese Tatsache, daß in der Lymphe mehr gelöste Partikelchen vorhanden sind als im Blute. Hierfür kommen aber nur die anorganischen Bestandteile und eventuell einige noch nicht genügend untersuchte organische Extraktivstoffe in Betracht; jedenfalls aber überwiegend die ersteren. Größere Gefrierpunktserniedrigung, beziehentlich mehr gelöste Partikelchen, bedeuten aber einen größeren osmotischen Druck der Lymphe gegenüber dem Blute. Da Wasser vom Orte niederen zum Orte höheren osmotischen Druckes in Bewegung gesetzt wird, so hat man, da die trennenden Membranen wasserdurchlässig sind, eine Wanderung von Wasser in der Richtung Blut zu Lymphe zu erwarten.

Mit Hilfe biologischer Methoden lassen sich in der Lymphe Stoffe von noch unbekannter chemischer Zusammensetzung nachweisen. Spritzt man gut geschlagenes arterielles oder venöses Blut vom selben Tier in eine kopfwärts ziehende Arterie, so daß es zunächst mit den empfindlichen nervösen Zentren der Atmung und des Kreislaufs im Kopfmark in Berührung kommt, so beobachtet man keine Veränderungen in dem Blutdruck, der Pulszahl und der Atmung. Ganz anders, wenn man gut geschlagene Lymphe vom gleichen Tiere in derselben Weise einspritzt. Dann beobachtet man auffallende Störungen in Kreislauf und Atmung, welche als Vergiftungserscheinnungen gedeutet werden müssen. Hieraus geht hervor, daß die Lymphe im Gegensatz zu dem Blute toxische Substanzen enthalten

muß. Die biologisch experimentelle Methode führt noch direkter zu der nämlichen Erkenntnis wie die morphologische Betrachtung. Denn wenn die Lymphe toxische Stoffe enthält, ergibt sich die Notwendigkeit dafür, daß sie vor ihrem Eintritt in das Blut entgiftet wird, was bei ihrer zwangsweise langsamen Passage durch die Lymphdrüsen besorgt wird. Die experimentell nachgewiesenen toxischen Stoffe entstehen unzweifelhaft im Quellgebiet der Lymphe, in den Geweben, infolge von deren Stoffwechselvorgängen. Die enge Beziehung zwischen Lymphe und Stoffwechselvorgängen tritt hier von einem neuen Gesichtspunkte aus zutage.

Die Lymphe enthält Gase, und zwar Spuren von Sauerstoffgas, 37 bis 53 % Kohlensäure und 1,6 % Stickstoff. Verglichen mit dem Blute ist nicht allein der Sauerstoffgehalt viel geringer, sondern etwas auch der Kohlensäuregehalt. Der Sauerstoffgehalt muß schon deshalb bedeutend kleiner sein, weil der Lymphe die roten Blutkörperchen, die Hauptträger des Blutsauerstoffes, fehlen. Für die Kohlensäure kommt dieses Fehlen weniger in Betracht. Bemerkenswerter ist jedoch, daß, wenn man Blutserum vom erstickten Tiere mit Erstickungslymphe vergleicht, auch hierbei der Kohlensäuregehalt der letzteren geringer ist. Von vornherein würde man erwartet haben, daß die Erstickungslymphe, welche doch direkt aus den Geweben, den Gebieten der stärksten Kohlensäurebildung stammt, auch den höchsten Kohlensäuregehalt besitzen würde. Weshalb es sich nicht der Erwartung gemäß verhält, läßt sich verschiedentlich deuten. Wichtiger sind zwei Schlüsse, welche aus diesem Verhalten gezogen werden müssen. Erstens die Untersuchung der Lymphe des Brustganges gibt uns nicht die Zusammensetzung der Flüssigkeit wieder, welche direkt die Gewebszellen umspült, ein Schluß, der auch durchaus damit in Einklang steht, daß die Lymphe jedenfalls in den Lymphdrüsen umgewandelt wird. Zweitens, da die Kohlensäure im wesentlichen mit Alkali zu Karbonaten verbunden, teilweise auch an Eiweiß gebunden vorkommt, müssen diese Salze aus der Gewebsflüssigkeit in das Blut übertreten, damit der Gehalt an Kohlensäure in diesem größer wird als in der Lymphe. Dies ist ein weiterer Grund, welcher verbietet, Lymphe und Gewebsflüssigkeit zu identifizieren.

Die Lymphe, welche aus anderen geeigneten Lymphstämmen aufgefangen wird, unterscheidet sich von der Lymphe des Brustganges, die man auch als Chylus bezeichnet, durch einen Mindergehalt an Eiweiß, Fett und einzelnen Extraktivstoffen. Es kann aber auch in einzelnen Fällen der Salzgehalt geringer sein, was schon daraus hervorgeht, daß die Gefrierpunktserniedrigung geringer ist als die des Blutes. Solche Lymphe hat einen geringeren osmotischen Druck als das Blut. Da sich der bestehende Unterschied des osmotischen Druckes am Ursprungsort der Lymphe nicht ausgeglichen hat, müssen besondere Kräfte vorhanden sein, um den Ausgleich hintanzuhalten

Noch mehr verschieden ist der Inhalt der serösen Höhlen. Diese Flüssigkeiten enthalten noch weniger Eiweiß, manchmal nur spurweise, auch kein Gerinnungsferment, weshalb sie nicht spontan gerinnen. Auch die Formelemente fehlen in denselben fast gänzlich. Im übrigen ist ihre Zusammensetzung ähnlich derjenigen des Blutplasmas, wobei allerdings nicht außer acht gelassen werden darf, daß die feineren Unterschiede im Gehalt an einzelnen Extraktivstoffen wegen der geringen zur Analyse verfügbaren Mengen und der Ungenauigkeit der Methoden nicht hinreichend zutage treten. Ganz abweichend ist die Zusammensetzung der Flüssigkeit in den serösen Gelenkhöhlen, der Synovia. Sie enthält mehr Eiweiß als die eigentliche Lymphe, darunter ein phosphorhaltiges Nucleoalbumin, und einen fadenziehenden, zähen Schleimstoff, das Synovin.

Unter pathologischen Bedingungen erscheinen in der Lymphe verschiedene Stoffe, welche sonst in derselben nicht auftreten. Teils sind es Stoffe, die in gewissen Zellen gebildet und nach außen abgeschieden werden, teils solche, die abnorme Zerfallsprodukte sind. Ein Beispiel für die erstere Gattung sind die Gallensäuren und Gallenfarbstoffe, welche unter normalen Bedingungen von der Leberzelle in die Galle abgeschieden werden, bei Verhinderung aber in die Lymphe innerhalb der Leber übertreten. Ein Beispiel für die zweite Gattung ist das Cholin, ein Zerfallsprodukt des besonders in der nervösen Substanz angehäuften Lecithins; das Cholin findet sich dann in der Cerebrospinalflüssigkeit, derjenigen Flüssigkeit, welche die serösen Höhlen des zentralen Nervensystems erfüllt. Das Auftreten derartiger abnormer Produkte ist deshalb nicht ohne Bedeutung, weil es ein Beweis dafür ist, daß die Gewebszellen Depots sind, aus denen die Lymphe Materialien beziehen kann. Andere Beweise gleicher Art waren oben erwähnt worden.

4. Die Bildung der Lymphe. Die physikalische und chemische Zusammensetzung der Lymphe weist darauf hin, daß das Ursprungsgebiet der Lymphe das Blut sowohl wie die Organzelle sein kann und die morphologischen Tatsachen deuten nach der gleichen Richtung. Bei der experimentellen Untersuchung nach den Beziehungen der Lymphe zum Blute und den Organzellen ist man

genötigt, auf eine noch wesentlichere Frage einzugehen, nämlich auf die Frage nach den Kräften, durch welche die Lymphe gebildet wird.

Wie bei vielen anderen Vorgängen im tierischen Organismus handelt es sich um das prinzipielle Problem, ob man die Bildung der Lymphe auf bekannte Kräfte physikalisch-chemischer Natur oder auf in der unbelebten Natur nicht anzutreffende Kräftewirkungen zurückführen kann. Der Weg, welcher zur Lösung einzuschlagen ist, ist klar vorgeschrieben. Es müssen bekannte Kräfte zur Einwirkung gelangen und es muß geprüft werden, ob Menge und Zusammensetzung der Lymphe in Abhängigkeit hiervon zu stehen scheinen. Einmal wird also zu untersuchen sein, inwiefern die Bildung der Lymphe abhängt von den mechanischen Momenten des Druckes und der Geschwindigkeit des Blutstromes und von der physikalisch-chemischen und chemischen Beschaffenheit des Blutes; zweitens ist zu ermitteln, ob und in welchem Umfange die Bildung der Lymphe von den Zuständen und Vorgängen in den Organen, aus denen die Lymphe stammt, abhängt.

In der Natur der Dinge liegt es, daß Schwierigkeiten der praktischen Durchführung der relativ einfachen Fragestellung sich in den Weg stellen; nur unter der Voraussetzung, daß über diese Schwierigkeiten Klarheit herrscht, ist eine Einsicht in das Problem der Lymphbildung möglich.

Was den Kreislauf anlangt, so lassen sich an demselben Eingriffe machen, welche im Blutstrom die etwa gewünschten mechanischen oder chemischen Aenderungen setzen. Der Ort nun, an dem diese Aenderung an der Lymphe sich geltend machen würde, ist in den Kapillaren. Denn es ist die Kapillarwand, durch welche der Austausch zwischen Blut und umgebender Flüssigkeit stattfindet. Diese Flüssigkeit erhält der Beobachter aber nicht zur Untersuchung, sondern eine Flüssigkeit aus Lymphstämmen, nachdem die Lymphe weite Gebiete und zahlreiche Lymphdrüsen durchflossen hat. Es ist also sehr viel Gelegenheit zu Aenderungen geboten. Sollte, was sehr wahrscheinlich ist, das Lymphsystem durch eine eigene Wandung gegenüber der Gewebsflüssigkeit abgeschlossen sein, so ist von vornherein die Lymphflüssigkeit von der aus den Blutgefäßen austretenden Flüssigkeit durch alle diejenigen Eigenschaften unterschieden, welche von den Permeabilitätsverhältnissen eben dieser Membran herrühren. Alle diese Momente lehren, daß die Untersuchung der Lymphe keinen direkten Aufschluß über die Zusammensetzung und Menge der aus dem Blute austretenden Flüssigkeit gibt. Hierzu kommt noch, daß es außerordentlich schwer ist, Eingriffe am Blutstrom so einzurichten, daß sie streng isoliert nur diesen beeinflussen und nichts weiter. Jede chemische Veränderung beeinflußt ohne weiteres eine Reihe von Organen. Teils kommt dies daher, weil eine Reihe von Organen, z. B. vor allem die Niere, mit der Funktion betraut sind, über die Zusammensetzung des Blutes zu wachen und durch einen feinspielenden Regulationsmechanismus dieselbe konstant zu erhalten, teils auch daher, weil die injizierten Substanzen mannigfache Reizwirkungen auf die umgebenden Gewebe ausüben. Sowie dies aber der Fall ist, gesellen sich erst recht alle Einflüsse hinzu, welche aus den verwickelten Stoffwechselvorgängen der Organe sich ergeben.

Umgekehrt entstehen bei dem Versuch, den Einfluß der Gewebe auf die Lymphbildung festzustellen, ähnliche Schwierigkeiten. Es ist nicht immer leicht, streng isoliert nur die Organzellen zu beeinflussen. Denn manche Organe lassen sich nur von dem Blutwege aus experimentell anregen. Sodann verknüpfen sich mit physiologischer Organtätigkeit mechanische Veränderungen des Kreislaufs und chemische Veränderungen der Kapillarwände und des Blutes durch die stofflichen Vorgänge bei der Organtätigkeit.

Die erste und scheinbar einfachste Frage, welches ich daher als der Beantwortung am dringlichsten bedürftig erweist, ist die, ob rein mechanische Einflüsse am Kreislauf, eine Aenderung des Blutes zu bewirken vermögen. Es ist sehr häufig gefragt worden, ob Blutdruckschwankungen Flüssigkeitsaustritt und Flüssigkietseintritt hervorzurufen vermögen. Es handelt sich darum, zu untersuchen, ob bei Blutdrucksteigerungen ein Flüssigkeitsaustritt aus den Kapillaren, bei Blutdrucksenkungen ein Flüssigkeitseintritt in die Kapillaren stattfindet. Im ersteren Falle würde das Blut eindicken, im zweiten sich verdünnen. Diese Aenderungen in der Konzentration des Blutes lassen sich am besten prüfen durch Bestimmung des Gehaltes an einer Substanz, von welcher man mit Sicherheit weiß, daß sie unter normalen Bedingungen die Blutbahn nicht verläßt. Eine solche Substanz ist der rote Blutfarbstoff, das Hämoglobin. Nimmt der Gehalt des Blutes an Hämoglobin, oder an Zahl der Blutkörperchen, was auf dasselbe herauskommt, zu, so hat sich das Blut eingedickt, nimmt er ab, so hat sich das Blut verdünnt. Da man diese Untersuchung mit sehr geringfügigen Blutungen vornehmen kann, ist eine Aenderung der Blutzusammensetzung durch den Eingriff nicht zu befürchten. Größere Blutentzüge müssen vermieden werden, da solche Veranlassung dazu geben, daß sofort aus den Geweben Flüssigkeit in die Blut-

bahn eintritt. Es ist dies ein sehr wichtiger Regulationsmechanismus für die Zusammensetzung des Blutes.

Die Angaben der Forscher über den Einfluß von Druckschwankungen auf den Flüssigkeitsaustausch durch die Kapillarwand lauten nicht übereinstimmend. Diejenigen, welche eine Bluteindickung bei Drucksteigerung finden, gelangen somit auch zu dem Ergebnis, daß Filtration ein Faktor sei, der in Betracht komme, diejenigen aber, welche keine Aenderung in der Blutzusammensetzung bei Drucksteigerung beobachten konnten, lehnen es ab, der Filtration eine Rolle zuzuschreiben. Es ist natürlich von Bedeutung zu wissen, ob der mechanische Faktor der Filtration diejenige Kraft ist, welche den wichtigen Vorgang des Flüssigkeitsaustausches beherrscht. Es zeigt sich nun, daß bei allen rein mechanischen Drucksteigerungen, z. B. bei solchen, wo die Erhöhung des Blutdrucks dadurch zustande kam, daß durch Setzung eines großen Widerstandes an einem Orte an einem anderen Orte, nämlich dem untersuchten, das Blut unter höherem Drucke floß, eine Aenderung in der Blutzusammensetzung nicht nachweisbar war. Beispielsweise kann man bewerkstelligen, daß die Speicheldrüse vom Blut unter niederem und höherem Druck durchflossen und das so unter verschiedenen Bedingungen sie verlassende Blut miteinander verglichen wird. Irgendein Eingriff auf das Organ selbst ist dabei vermeidbar. Gerade weil andererseits dieselbe Drüse wiederum isoliert, physiologischen Aenderungen ihres Tätigkeitszustandes unterworfen werden kann, und dabei mit aller Schärfe Unterschiede in der Blutzusammensetzung auffindbar sind, ist der Nachweis, daß Flüssigkeit nicht filtriert, wichtig. Diejenigen Beobachtungen, welche bei Drucksteigerungen entsprechende Konzentrationszunahmen des Blutes ergeben, stützen sich auf die intravenöse Injektion von Adrenalin. Adrenalin, die wirksame Substanz der Nebenniere, treibt allerdings den Blutdruck wesentlich in die Höhe, aber es ist nicht das einzige, was es macht. Denn es wirkt auf eine große Reihe von Organen ein, dieselben zu intensiver Tätigkeit weckend, teils auch dieselben in ihrer Aktivität hemmend. Insbesondere vermag es eine Reihe von absondernden Drüsen zu lebhafter Sekretion anzuregen. Derartige Sekretion ist aber, wie leicht ersichtlich und bald gezeigt werden soll, von großem Einflusse auf die Blutzusammensetzung. Andererseits ist es fraglich, ob das Adrenalin gerade an demjenigen Orte, auf den es ankommt, nämlich die Kapillaren, den Druck steigert. Das Adrenalin verengt die kleinen Arterien diesseits der Kapillaren und der in größeren Arterien gemessene Blutdruck steigt daher. Die Kapillaren sind aber, wie die direkte Beobachtung lehrt, auf der Höhe der Adrenalinwirkung wegen des mangelhafteren Blutzuflusses blutleerer und in ihnen der Kapillardruck nicht erhöht. Es entbehren daher die Versuche mit Adrenalin der entscheidenden Beweiskraft für das Walten der Filtrationskräfte im Dienste des Flüssigkeitsaustausches zwischen Blut und Gewebe.

Die Voraussetzung dafür, daß Filtration für die hier betrachteten Vorgänge eine Rolle spielt, ist die, daß ein Druckunterschied zwischen Kapillardruck und dem Druck, unter dem die Gewebsflüssigkeit steht, herrscht. Denn die Größe dieses Unterschiedes ist das Maßgebende. Während die einen Forscher das Vorhandensein dieses Druckunterschiedes als sicher ansehen, sind andere Forscher zu ganz anderen Resultaten gelangt, indem sie Gleichheit des Druckes in den Kapillaren, der Gewebsflüssigkeit und dem flüssigen Zellinhalt behaupten. Wenn das der Fall ist, so würde jedes Steigen und Fallen des Kapillardruckes ein Steigen und Fallen des Druckes in der Umgebung im Gefolge haben und keinesfalls eine Vergrößerung des zur Filtration nötigen Druckunterschiedes; beziehentlich des umgekehrten, herbeiführen. Die Versuchsanordnungen, aus welchen die entgegengesetzten Resultate der Forscher abgeleitet wurden, gründen sich auf ziemlich verwickelte mechanische Verhältnisse. Die sehr wünschenswerte Entscheidung in dem einen oder dem anderen Sinne ist noch nicht erfolgt. Aus diesem Grunde ist man noch genötigt, Gewicht auf die einzelnen indirekten Methoden zu legen, durch welche man erfährt, ob Flüssigkeiten, deren Zusammenhang mit dem Blute feststeht, in ihrer Bildung durch solche Momente begünstigt werden, welche einer Filtration förderlich sind. Daher kommt es, daß trotz prinzipieller Bedenken, der etwaige Einfluß der Filtration auf die Bildung der Lymphe, der Transsudate und des Harns sowie auf den direkten Austritt von Flüssigkeit aus dem Blute so vielfach erforscht wird.

Blutdrucksenkung ist durchaus nicht immer von einer Verdünnung des Blutes begleitet, was notwendigerweise eintreten müßte, wenn Rückfiltration aus dem Gewebe stattfände. Nur wenn die Blutdrucksenkung durch Blutentziehung herbeigeführt wird, findet sich die zu postulierende Blutverdünnung, welche ungemein rasch eintritt. Es wurde schon oben dieses Vorganges als eines Regulationsmechanismus gedacht. Es liegt eine Regulation insofern vor, weil durch den Eintritt von viel Flüssigkeit in die Blutbahn der durch Blutentzug verursachten Erniedrigung des Kapillar-

druckes entgegengewirkt wird. Es läßt sich nun nicht ohne weiteres behaupten, daß diese Regulation nur infolge der Blutdrucksenkung geschieht, denn sonst müßte sie eben bei jeder Blutdrucksenkung sich einstellen. Vielmehr können dafür auch die Veränderungen verantwortlich gemacht werden, welche die Kapillarwände und mittelbar das Geschehen in den Organen durch den Blutentzug erleiden.

Zusammengefaßt ist der augenblickliche Stand des Problemes, ob rein mechanische Aenderungen des Blutdruckes direkt am Blut wahrnehmbare Aenderungen der Blutzusammensetzung verursachen, welche im Sinne einer Filtration sprechen, der, daß die Wagschale zugunsten der Ablehnung einer Filtration zu sinken scheint.

Die Bildung der Lymphe als einen Filtrationsvorgang zu betrachten, dafür bestand seit dem Beginn der experimentellen Aera der Physiologie eine große Neigung. Die chemische Zusammensetzung der Lymphe ließ dies sehr plausibel erscheinen. Denn wenn durch Wände, wie sie die Kapillarwände sind, eine Flüssigkeit wie das Blutplasma filtrieren würde, könnte eine Flüssigkeit, wie die Lymphe ist, entstehen. Daß die Lymphe eiweißärmer ist als das Blutplasma, würde sich daraus erklären, daß durch die Wände der Kapillaren, welche aus kolloidem Material bestehen, nur wenig kolloides Eiweiß innerhalb kurzer Zeit filtrieren könne, zumal die Druckkräfte für die Filtration von kolloiden Substanzen nicht sonderlich große sind. Da man ferner beobachtete, daß, wie in Filtrationsversuchen, bei Erhöhungen des arteriellen Druckes relativ weniger Eiweiß in der Lymphe sich vorfand, schien auch dieses Verhalten mit der Möglichkeit im Einklang zu stehen, daß die Lymphe durch Filtration entstände. Nun ist der Eiweißgehalt der aus verschiedenen Gewebsgebieten stammenden Lymphe recht verschieden. Aber auch dieser Tatsache kann die mechanische Filtrationstheorie gerecht werden, indem eine verschieden große Permeabilität der Kapillargefäße für Eiweiß angenommen wird. Insbesondere müßte in den Kapillaren der Leber die Permeabilität sehr groß sein, weil die Leberlymphe stets eine große Eiweißkonzentration aufweist. Solange nun das Augenmerk auf die Konzentration der Lymphe an Eiweiß und ihre sonstige angenäherte Uebereinstimmung mit dem Blutplasma gerichtet ist, kommen die Schwierigkeiten nicht zur Geltung, die in den oben geschilderten feineren Unterschieden zwischen Lymphe und Blut beruhen. Die durch Gefrierpunktserniedrigung gefundene gelegentlich größere Konzentration der Lymphe an gelösten Teilchen und andererseits die gleichfalls gelegentliche geringere Konzentration derselben sind nicht gemeinschaftlich aus dem Entstehen der Lymphe durch bloße Filtration verständlich. Jede Erscheinung für sich erfordert eine Erklärung durch besondere Hilfsmomente.

Die experimentelle Prüfung der Lymphbildung unter dem Einflusse von Blutdrucksteigerung hat unzweifelhaft in einem Falle vermehrten Ausfluß von Lymphe ergeben, nämlich dann, wenn die Druckerhöhung durch venöse Stauung zustande kam. Die Behinderung des Blutabflusses durch die Venen erhöht aus einfachen mechanischen Gründen den Druck in den vor ihnen liegenden Kapillaren. So klar das Versuchsergebnis zu sein scheint, so wenig eindeutig ist es bei der näheren Analyse, sowie die Frage aufgeworfen wird, warum eine rein arterielle Drucksteigerung nicht ebenso unzweifelhaft die Menge der ausfließenden Lymphe vermehrt. In Wahrheit handelt es sich bei venöser Stauung nicht bloß um das rein mechanische Phänomen der Drucksteigerung in den Kapillaren, sondern auch darum, daß Abfallprodukte, die in den Geweben entstehen und durch die Blutgefäße abgeführt werden, liegen bleiben und dadurch Gewebe und Kapillarwände anders beeinflußt werden als in der Norm. Sobald die Gefäßwände geschädigt werden, kommt es zu einem abnormen Flüssigkeits- und Stoffaustritt aus den Kapillaren. Derartige Schädigungen können durch Gifte, z. B. Arsen, Chloroform, Aether, mannigfache Stoffwechselprodukte und durch mechanische und thermische Schädigungen veranlaßt werden. Derartige Schädigungen sind es auch, welche in Krankheitsfällen den massenhaften Flüssigkeitsaustritt, Oedem genannt, an Orten hervorrufen, an denen sonst nur spärliche Flüssigkeit zu konstatieren ist. Es ist klar, daß bei geschädigten Kapillarwänden der Druck von Einfluß sein kann. Es ergibt sich, daß die Beobachtungen über den Einfluß des Druckes auf die Lymphbildung zu demselben Resultate führen, wie die über die Blutzusammensetzung.

Ganz anders steht die Sache mit der Tätigkeit der Organe. Sobald ein Organ in intensive Tätigkeit versetzt wird, lassen sich zwei Veränderungen konstatieren: erstens Eindickung des Blutes, zweitens vermehrte Lymphbildung. Zwischen beiden Tatsachen besteht ein offenkundiger, näherer Zusammenhang: Die Eindickung des Blutes wurde beispielsweise beobachtet bei streng isolierter Tätigkeit der Speicheldrüse. Reizung des sekretorischen Nerven derselben, der Chorda tympani, bewirkt reichliche Speichelabsonderung. Das aus diesem Organe abfließende Blut ist erheblich konzentrierter geworden als das einfließende Blut. Unter denselben Bedingungen wird gefunden, daß

die aus der Speicheldrüse herrührende Lymphe an Menge zunimmt. Nun ist Organtätigkeit ein sehr komplexer Vorgang, an dem mehrere Faktoren mitwirken. Es handelt sich also darum, denjenigen oder diejenigen Faktoren herauszuheben, welche wesentlich sind.

Mit der Organtätigkeit gehen einher mechanische Aenderungen des Kreislaufs. Die Menge Blutes, welche das tätige Organ durchfließt, also die Stromgeschwindigkeit, nimmt zu und der Kapillardruck wächst. Daß dieser letztere Faktor weder für die Aenderung in der Blutzusammensetzung noch für die Menge der gebildeten Lymphe maßgebend ist, wurde schon ausgeschlossen. Andererseits läßt sich gerade an dem gewählten Beispiel der Speicheldrüse sehr schön demonstrieren, daß die spezifische Tätigkeit der absondernden Drüsenzelle es ist, welche für das Zustandekommen von Blutveränderung und Lymphvermehrung unentbehrlich ist. Injiziert man das Gift Atropin und reizt den Nerven der Speicheldrüse, so fehlt jede Sekretion, weil Atropin die absondernde Zelle vergiftet, aber alle Aenderungen des Kreislaufes bleiben erhalten. Mit dem Wegfall der Absonderung verschwindet aber auch die Aenderung der Blutzusammensetzung und die Vermehrung des Lymphausflusses. An dem durch seine natürlichen Bedingungen für die experimentelle Analyse besonders günstigen Organe tritt klar zutage, daß die spezifische Tätigkeit der Organzelle das maßgebende auslösende Moment ist. Auch an anderen Organen, beispielsweise an der Leber und an der Bauchspeicheldrüse, läßt sich zeigen, daß, wenn sie zu ihrer normalen Tätigkeit in passender Weise veranlaßt werden, die Lymphe, welche dort ihr Quellgebiet hat, an Menge zunimmt.

Mit dem Nachweise, daß die Organtätigkeit das auslösende Moment für die Lymphbildung abgibt, steht die frühere, auf morphologischem Boden erwachsene Erkenntnis von der Bedeutung der Lymphdrüsen in vollständiger Harmonie. Die Lymphdrüsen haben die Aufgabe gewisse Stoffwechselprodukte der Organtätigkeit zu verarbeiten und die ihnen zuströmende Lymphe entsteht im Zusammenhange mit der Organtätigkeit.

Der Nachweis, daß die Organtätigkeit das auslösende Moment für die Lymphbildung sei, erschöpft nicht die Bedingungen, welche an dem Ablauf dieses Vorganges unter normalen Verhältnissen beteiligt sein mögen. Es leuchtet ein, daß der oben genannte Faktor der Blutstromgeschwindigkeit nicht gleichgültig sein kann, sowie einmal die Bedingungen für einen lebhaften Austritt aus den Gefäßen gegeben sind. Ferner besteht die Möglichkeit, daß besondere Produkte der Organtätigkeit einen Einfluß auf die Durchlässigkeit der Gefäße besitzen und daß die überall vorhandenen Gefäßnerven gleichfalls für die Gefäßdurchlässigkeit von Bedeutung sein können. Was den letzten Punkt anlangt, so haben Experimente vorläufig im negativen Sinne entschieden. In dem oben erwähnten Beispiel der Speicheldrüse tritt nach Atropinvergiftung keine Beeinflussung des Flüssigkeitsaustrittes aus den Gefäßen ein, obwohl die Wirkung der Nerven auf die Gefäße, die in einer starken Erweiterung besteht, erhalten bleibt. Um die zum Teil bekannten, zum Teil unbekannten Faktoren, von denen die Lymphbildung im einzelnen abhängt, zu erkennen, bedarf es der experimentellen Erforschung der Lymphbildung unter planmäßiger Gestaltung der Versuchsbedingungen.

In erster Linie bietet sich hierzu die künstliche Veränderung der Blutzusammensetzung durch Zufuhr von großen Flüssigkeitsmengen, am besten durch Injektion einer Kochsalzlösung von etwa 0,9 %. Beim Säugetier ist diese Kochsalzlösung die physiologische, weil sie den gleichen osmotischen Druck besitzt wie das Blut. Die Folge einer derartigen Injektion für den Lymphausfluß ist eine starke Vermehrung desselben. Gleichzeitig ereignen sich im Organismus eine Reihe von physikalischen und physiologischen Erscheinungen. Das Blutgefäßsystem wird mit verdünnender Flüssigkeit überfüllt — ein Zustand, der als hydrämische Plethora bezeichnet wird — der Druck in den Kapillaren ist erhöht, die Blutstromgeschwindigkeit erfährt eine Zunahme und, im Zusammenhange hiermit, ist das Volum einzelner Organe gegen die Norm erheblich vergrößert. Von physiologischen Erscheinungen fällt vor allem die profuse Absonderung einer Reihe von Drüsen, wie Tränendrüse, Speicheldrüse, Darmdrüsen und Nieren in die Augen.

Genau die gleichen Erscheinungen beobachtet man, wenn relativ geringe Mengen konzentrierter Lösungen einer Anzahl von kristalloiden Stoffen, wie Salze, Harnstoff und Zucker, in eine Vene injiziert werden. Der sich infolge hiervon zunächst abspielende Vorgang ist in seinen Einzelheiten bekannt. Die injizierten Stoffe verlassen mit überraschender Geschwindigkeit infolge von Diffusion die Blutbahn, sie wirken hier anziehend auf das Gewebswasser der Zellen, Fasern usw. und Wasser tritt in die Blutbahn. In nicht zu langer Zeit findet man das Blut verdünnt und alle Verhältnisse so wie bei massenhafter Injektion von physiologischer Kochsalzlösung. Es macht den Eindruck, als ob die vermehrte Lymphbildung in beiden Fällen auf rein physikalischen Momenten beruhe. Der gesteigerte Druck in den Kapillargefäßen kann allerdings ausgeschlossen

werden, denn die langanhaltende vermehrte Lymphbildung nach intravenöser Injektion von konzentrierten Kristalloidlösungen tritt auch ein, wenn das Tier mehrere Minuten nach der Injektion getötet oder, wenn durch Blutentzug der Druck in den Kapillaren erniedrigt wird. Aber die physikalisch-chemischen Kräfte der Diffusion beziehentlich Osmose würden hinreichen, diese Art der Lymphbildung zu erklären, wobei noch hinzukommt, daß die Lymphbeschleunigung verschiedener Salze ihrem Wasserentziehungsvermögen parallel geht, ein Parallelismus, der übrigens auch für die Wirkung derselben Salze auf die Harnabsonderung gilt. Das Bemerkenswerte an der zuletzt beschriebenen Art der Lymphbildung ist jedenfalls, daß der größere Teil der abfließenden Flüssigkeit nicht aus dem Blute, sondern aus den Geweben stammt, wodurch der wichtige Nachweis geliefert wird, daß die Gewebe und nicht ausschließlich das Blut als Quelle der Lymphe zu berücksichtigen sind.

Bei aller Anerkennung des Anteils, den physikalisch-chemische Kräfte bei diesen experimentell erzeugten Vermehrungen des Lymphausflusses besitzen mögen, bleibt die Tatsache bedeutsam, daß auch Organtätigkeit im Spiele ist und nicht ausgeschlossen werden kann. Tatsächlich fließt die Lymphe ausschließlich in vermehrter Menge nur aus Gebieten ab, wo größere Komplexe drüsiger Organe vorhanden sind, während Körpergebiete, die wesentlich aus Muskulatur bestehen, kaum eine Vermehrung ihrer Lymphe beobachten lassen. Hier ließ sich in sehr eleganter Weise der Nachweis liefern, daß der Unterschied nicht in einer sehr wohl annehmbaren, größeren Durchlässigkeit der Drüsengefäße gegenüber den Gefäßen der Muskulatur beruhe. Injizierte Flüssigkeiten und die in ihnen enthaltenen Salze verlassen sehr schnell, wie gesagt, die Blutbahn. Ein Teil derselben verläßt dieselbe durch die Niere und andere absondernde Drüsen. Der Sinn dieser gesteigerten Absonderung ist offenbar, daß der Organismus möglichst von dem abnormen Ueberschuß an Wasser und Stoffen entlastet wird. So groß aber auch das Regulationsvermögen namentlich der Niere ist, es reicht doch nicht hin, um die großen Mengen, welche im Experiment in die Blutbahn gebracht werden können und welche nachweislich in kurzer Zeit die Blutbahn verlassen haben, zu entfernen. Bei der Untersuchung, wo das geblieben ist, was nicht durch die Drüsen und auf dem Wege des Lymphstroms beseitigt wurde, findet sich, daß die Gewebe, insbesondere auch die Muskeln, ein riesiges Depot darstellen, in das große Mengen Flüssigkeit und Stoffe abwandern. Folglich müssen die Gefäße der Muskulatur eine sehr gute Durchlässigkeit besitzen. Es folgt aber auch hieraus, daß die Menge der Lymphbildung nicht von der Durchlässigkeit der Gefäße abhängig ist. Diese Eigenschaft der Gefäßwand bestimmt nur, ob Flüssigkeit in großer Menge und rasch die Gefäßbahn verläßt, nicht aber, ob viel Lymphe gebildet wird.

Die Gefäßwände sind von lebenden Zellen besetzt und das am meisten charakteristische Merkmal lebendiger Gebilde ist ihre Befähigung, durch passende Reize erregt zu werden. Deshalb mußte daran gedacht werden, ob nicht die chemische Veränderung der Blutzusammensetzung als Reizmittel auf die Zellen der Kapillargefäßwände wirke und dieselben dann im Zustande der Erregung gegenüber dem der Ruhe andere Durchlässigkeit besitzen. Dieser berechtigte Gedanke ließ sich experimentell prüfen. Pro jedes Gramm injizierten Stoffes, welches die Blutbahn verläßt, tritt Wasser aus den Geweben in die Blutbahn. Man konnte nun vor der Injektion aus einem Blutgefäß so viel Blut entnehmen, wie der Berechnung nach hinterher Wasser eintreten würde. Dadurch wird erzielt, daß sich die Stoffe hinterher in abnorm großer Konzentration im Blute befinden, aber jener oben beschriebene Zustand der hydrämischen Plethora mit allen seinen mechanischen Folgen nicht zur Ausbildung gelangt, weil im Blute schließlich sich so viel Flüssigkeit wie vor jedem Eingriff befindet. Der Erfolg für die Lymphbildung ist der, daß die Vergrößerung derselben wegfällt. Hierdurch ist entschieden, daß die abnorme Konzentration von injizierten Kristalloiden innerhalb der Blutbahn deren lebende Zellen nicht zu einer Aktivität zu erwecken vermögen, welche regelnd in den Flüssigkeitsaustritt eingreift. Natürlich ist hierdurch die Aktivität dieser lebenden Zellen nicht in Abrede gestellt. Dieselben besitzen eine durch ihre Kontraktilität sich leicht dokumentierende wichtige Lebenstätigkeit.

Der gemeinschaftliche Wegfall von vergrößerter Lymphbildung und von gewissen mechanischen Zustandsänderungen legt erneut nahe, hierin einen kausalen Zusammenhang zu erblicken und diese Auffassung wird auch vertreten. Da aber andererseits unter den Bedingungen der soeben entwickelten Versuchsanordnung auch die Tätigkeit der Organe keine erhöhte ist, kombiniert sich auch dieser Wegfall mit dem Wegfall der Lymphvermehrung. Das Unterbleiben der Organtätigkeit beruht auf der Tatsache, daß nach einem Blutentzug die injizierte Substanz, anders wie unter normalen Bedingungen, nur sehr langsam die Blutbahn verläßt. Außerhalb der Blutbahn verursachen die einzelnen Salze eine gut ausgesprochene

Reizwirkung. Das läßt sich sehr deutlich beispielsweise an dem leichtzugänglichen Auge zeigen. Untereinander in bezug auf ihre physikalischen Eigenschaften gleichwertige Lösungen kristalloider Substanzen erzeugen, unter die Bindehaut des Auges gebracht, eine ganz verschiedene Reizwirkung. In gleicher Weise muß das auch für andere Orte des Organismus angenommen werden.

Man ist bei der Analyse aller Erscheinungen, die sich hinsichtlich der Lymphbildung nach Injektion von kristalloiden Stoffen in die Blutbahn ergeben haben, schließlich zu der Auffassung gelangt, daß physikalische und physiologische Momente hierbei im Spiele sind. Die physikalischen Momente sind: erstens die Aenderung des osmotischen Druckes des Blutes, wodurch entweder ein Flüssigkeitsstrom vom Blut in die Gewebe oder umgekehrt von den Geweben in das Blut verursacht wird; zweitens die Diffusion, welche durch den Konzentrationsunterschied innerhalb und außerhalb der Blutbahn unterhalten wird; drittens die Beschleunigung des Blutstroms durch Gefäßerweiterung und erhöhten Kapillardruck, wodurch die Diffusion, der Austausch durch die Gefäßwand gefördert werden muß. Zu den physikalisch-chemischen Momenten muß auch noch die Eigenschaft der Gefäßwand gerechnet werden, für einzelne Kristalloide eine ganz verschiedene Durchlässigkeit zu besitzen; übrigens besteht auch ein erheblicher Unterschied der Durchlässigkeit gegenüber kolloiden Stoffen, z. B. den verschiedenen Eisweißarten. Das wesentliche physiologische Moment liegt in den Reizwirkungen, welche injizierte Flüssigkeit und Stoffe auf die Gewebe auszuüben vermögen, mit denen sie in Beziehung kommen. Dadurch werden physiologische Leistungen der Zellen geweckt, welche sich in Stoffwechselvorgängen recht komplizierter Art äußern. Diese, die in letzter Linie auch physikalisch-chemische oder chemische Prozesse sind, bedingen in denjenigen Organen, welche zu intensiver Lymphbildung befähigt sind — es sind das, wie oben gezeigt wurde, durchaus nicht alle — gesteigerte Lymphbildung.

Ein großes Interesse beansprucht die Tatsache, daß es Stoffe gibt, welche in spezifischer Weise lymphtreibend wirken. Das Spezifische besteht darin, daß die intravenöse Injektion dieser Stoffe in keiner erkennbaren Weise die mechanischen Verhältnisse des Kreislaufs beeinflußt und daß die zur Wirkung benötigte Menge von diesen Stoffen so geringfügig ist, daß auch die physikalisch-chemische Zusammensetzung des Blutes keine in Betracht kommende Aenderung erleidet. Es sind eine Reihe eigenartiger und recht heterogener Stoffe, welche zu dieser Klasse von lymphtreibenden Körpern gehören, beispielsweise Extrakte von Krebsmuskeln, von Muscheln, von Fischfleisch, von Himbeeren, von Blutegelköpfen, eiweißartige Abbauprodukte des Eiweißes, körperfremde Eiweißkörper und giftige Produkte, die aus Bakterienleibern stammen. Die gemeinsamen Züge, welche der Wirkung dieser Stoffe auf die Lymphbildung zukommen, sind: bald nach der Injektion einer geringen Menge in das Blut bricht eine starke Beschleunigung des Lymphflusses aus; die ausfließende Lymphe ist viel konzentrierter als in der Norm, und zwar betrifft die Konzentrationszunahme vornehmlich die Eiweißkörper; die Lymphe selbst verliert ihre Gerinnungsfähigkeit. Die Untersuchung des Blutes weist dementsprechend eine Abnahme an Eiweiß auf und auch die Gerinnungsfähigkeit des Blutes ist herabgesetzt. Die große Giftigkeit dieser Stoffe tut sich dadurch kund, daß schon verhältnismäßig kleine Dosen Herz und Gefäße schädigen, wodurch es zu einer gefährlichen Blutdrucksenkung kommt.

Mit der Aufdeckung dieser Körper und ihrer charakteristischen Wirkung auf die Lymphbildung glaubte man den schon öfters postulierten spezifischen Reizmitteln der Gefäßwandzellen auf der Spur zu sein. Die Lymphbildung unter ihrem Einflusse würde, ähnlich wie bei Drüsenzellen die Sekretion, ein spezifischer Absonderungsprozeß sein. Auch bei der normalen Lymphbildung würde folgerichtig eine Art Absonderung, also ein vitaler Vorgang, durch die Gefäßwände anzunehmen sein. Dieser Gedanke hat lebhaften Anklang gefunden, weil er geeignet war, einen besonders wichtigen und der Aufklärung bedürftigen Punkt des Stoffaustausches zwischen Blut und Gewebe zu beleuchten. Jedes Gewebe hat nämlich seinen eigenen Bedarf an Art und Menge der Stoffe. Ein sehr anschauliches Beispiel für die bestehende Schwierigkeit hat v. Bunge zur Diskussion gestellt: „Die Milch rasch wachsender Tiere ist sehr reich an Kalk. Die Hundemilch enthält 4 bis 5 g Kalk im Liter. Eine Hündin von 20 bis 30 kg Körpergewicht sezerniert in 24 Stunden reichlich ½ Liter Milch und darin sind also 2 bis 2½ g Kalk enthalten. Ein Liter Blutplasma enthält nur etwa 0,2 g Kalk, also 10 bis 12 mal weniger. Wenn also die Epithelzellen der Milchdrüsen ihr Material zur Milchbereitung dem transsudierten Plasma (d. h. der Lymphe) entnehmen sollten, so müßten wenigstens 10 Liter Plasma in 24 Stunden die Milchdrüse durchfließen. Daran ist gar nicht zu denken: durch den ganzen Körper des Tieres fließen nur 1 bis 2 Liter Lymphe — wieviel weniger durch die Lymphdrüse.“ Spezifische Absonderung durch die Gefäßwände, geweckt durch spezifische Reizmittel,

würde eine befriedigende Erklärung für die durch obiges Beispiel postulierte Auswahl der Stoffe in bezug auf Art und Menge durch die Gefäßwandzelle liefern.

Die experimentelle Erforschung der Wirkung dieser Klasse lymphtreibender Stoffe hat aber eine Reihe von Tatsachen zutage gefördert, welche diese willkommene Lösung in Frage stellten und die Erkenntnis nach einer anderen Richtung lenkten. Die spezifischen Stoffe erwiesen sich als ausschließlich auf die Leber wirkend. Abbindung der Lymphgefäße, welche aus der Leber kommen, hebt jede Vermehrung des Lymphstromes auf. Die Stoffe würden also günstigenfalls nur auf die Leber wirken und man hat auch die Annahme gemacht, daß sie in spezifischer Weise die Durchlässigkeit der Lebergefäße vermehren, welche an und für sich schon für Eiweißtransport besonders geeignet sein sollen. Andere Tatsachen jedoch gestatten den Anschluß an denjenigen Vorgang, welcher früher unter rein physiologischen Bedingungen als die wesentliche Auslösung für Lymphbildung erkannt wurde, nämlich die Organtätigkeit. Alle diese Stoffe nämlich steigern die Tätigkeit der Leber, wie daran erkannt wird, daß die Leber unter dem Einflusse dieser Stoffe vermehrt Galle absondert und die Leberzelle histologisch tiefgreifende Veränderungen im Sinne der Tätigkeit aufweist. Im Einklang hiermit steht auch die Ungerinnbarkeit der Lymphe und des Blutes. Denn es ist gezeigt worden, daß die Leber einen diese Gerinnung hemmenden Stoff abzusondern vermag und daß auch bei rein physiologischen Tätigkeitsäußerungen der Leber, z. B. Anregung der Gallenabsonderung, die Abnahme der Gerinnungsfähigkeit der Lymphe eine konstante Begleiterscheinung ist. Die Lymphbildung infolge dieser eigentümlichen Stoffe würde im Lichte dieser Tatsachen auf einen Fall intensiver Lebertätigkeit durch spezifische Lebergifte zurückgeführt sein.

Der augenblickliche Stand der Lehre von der Lymphbildung ist der eines Problemes mit Ausblicken zur Lösung, ohne daß die definitive Lösung erreicht wäre. Die hier entworfene Schilderung sollte zeigen, daß — kurz gesagt — die physiologischen Vorgänge der Organtätigkeit und physikalisch-chemische Prozesse, die auf Osmose und Diffusion beruhen, wesentliche Momente der normalen Lymphbildung sind. Daß die Osmose und Diffusion an dem kolloidalen Material der Gefäßwand und Gewebszellen von sicher von Ort zu Ort wechselnder Beschaffenheit stattfindet, kompliziert selbst den unzweifelhaft physikalisch-chemischen Anteil der Lymphbildung. Denn wo Kolloide im Spiel sind, beobachten wir große Variabilität und wechselnde Abhängigkeiten von geringfügigen Abänderungen der Umgebung. Da die Lymphbildung zu den Lebensvorgängen gehört, muß im Auge behalten werden, daß alles, was wir von deren unbekannten Seiten und deren Zweckmäßigkeit anderwärts erfahren, auch hier nicht ausgeschaltet werden kann.

5. Bildung von lymphähnlichen Flüssigkeiten. Die Bildung der „lymphähnlichen" Flüssigkeiten in den großen Hohlräumen des Herzbeutels, der Brust- und Bauchhöhle, in dem Augeninnern (Kammerwasser), in den Gelenken usw. wurde lange Zeit als ein Filtrationsvorgang betrachtet. So gut wie bei der eigentlichen Lymphe ist das auch bei diesen Flüssigkeiten fraglich geworden. Nur bei der Flüssigkeit der Augenhöhle, dem Kammerwasser, sprechen eine Reihe von Tatsachen dafür, daß der Druckunterschied zwischen den Kapillardruck und dem der Augenflüssigkeit von Einfluß auf die Bildung der letzteren sei. An allen anderen Orten ist keine eindeutige Abhängigkeit der Flüssigkeitsbildung von rein mechanischen Momenten gefunden worden. Alle genannten Höhlen sind mit einem Zellbelag von Endothelzellen ausgekleidet. Sowie man auf dem Wege des Ausschlusses zur Annahme gelangt, daß diese Zellen regelnd und auswählend dasjenige bestimmen, was unter normalen Bedingungen in die von ihnen ausgekleideten Höhlen eintritt, liegt nicht ein Problem der Lymphbildung, sondern der Sekretion vor und unter diesem Gesichtspunkte wird die Bildung der serösen Flüssigkeiten anderenorts zu betrachten sein.

6. Zirkulationsmechanik der Lymphe. Der Druck, unter dem die Lymphe steht, ist ein sehr geringer. An den Halsgefäßen des Hundes wurde er zu 8 bis 18 mm einer Sodalösung bestimmt. Am Entstehungsort der Lymphe dürfte er annähernd den Wert des Kapillarendruckes erreichen, also eine Größe besitzen, deren Mittelwert beim Menschen ca. 30 mm Quecksilberdruck beträgt. Die Endmündungsstelle der Lymphe ist dort, wo der Brustgang sich mit den großen Venen am Eingang des Brustraumes vereinigt. Der Druck daselbst beträgt 0. Entsprechend dem geringen Druckgefälle ist die Geschwindigkeit des Lymphstromes eine sehr geringe.

Bei einzelnen Tierarten, bei den Amphibien, Reptilien und Vögeln, finden sich an gewissen Stellen des Lymphsystems pulsierende Organe, die Lymphherzen, eingeschaltet. Dieselben vermögen die Lymphe weiterzupumpen. Es sind automatisch tätige Gebilde, welche aber durch Nerven aus dem Rückenmark auch der Herrschaft des zentralen Nervensystemes unterworfen sind.

Dort, wo selbständige Pumporgane fehlen, was bei weitem der häufigste Fall ist, wird das

Fortschaffen der Lymphe durch andere Hilfsmittel besorgt. Abgesehen von dem Druckgefälle sind wesentliche Triebkräfte für das Fließen der Lymphe die Bewegungen der Gliedermuskeln und die Atembewegungen des Brustkorbes und Bauches. Aus einer ruhig daliegenden Extremität erhält man so gut wie keine Lymphe. Sobald aber passive Bewegungen gemacht werden, oder gar eine kräftige Massage ausgeführt wird, fließt Lymphe ab. Die Atembewegungen wirken aspirierend; der Druck im Brustraum sinkt bei jeder Einatmung und hierdurch wird der Abfluß nach dem Brustraum begünstigt.

Es sind aber noch andere Triebkräfte vorhanden, wie durch zwei Tatsachenreihen bewiesen wird. Erstens kann unter gewissen Bedingungen ein langandauernder, postmortaler Lymphfluß zustande kommen; zweitens wurde beispielsweise beim Frosch gefunden, daß nach Ausschluß jeder Blutzirkulation Resorption von Giften aus den Lymphsäcken und Transport der Gifte bis zum Zentralnervensystem stattfindet. Die dabei wirkenden Triebkräfte können ausschließlich im Lymphstrom selbst gelegen sein. Experimentell sind dieselben noch nicht aufgeklärt.

Literatur. *Zusammenfassungen: Handbuch der Physiologie von W. Nagel, Bd. 2:* **Overton**, *Ueber den Mechanismus der Resorption und der Sekretion. — Handbuch der Physiologie von L. Hermann, Bd. 5 II:* **v. Wittich**, *Physiologie der Aufsaugung Lymphbildung und Assimilation. — Ergebnisse der Physiologie von L. Asher und K. Spiro:* **Ellinger**, *Die Bildung der Lymphe, 7. Jahrgang 1908. —* **Zangger**, *Ueber Membranen und Membranfunktionen. — Osmotischer Druck und Jonenlehre von H. S. Hamburger, Bd. 2:* **R. Hoeber**, *Physikalische Chemie der Zelle, 2. Aufl. — Handbuch der physikalischen Chemie und Medizin von Korányi und Richter, Bd. 1:* **R. Hoeber**, *Die Lymphbildung. — Handbuch der Biochemie von C. Oppenheimer, Bd. 2:* **R. Magnus**, *Bildung der Lymphe. — Textbook of Physiology von Schäfer, Bd. 1:* **Starling**, *The production and absorption of Lymph. — Biochemisches Zentralblatt Bd. 4:* **L. Asher**, *Die Bildung der Lymphe. —* **Derselbe**, *Der physiologische Stoffaustausch zwischen Blut und Geweben, 1909. — Spezielle Arbeiten seit 1891:* **R. Heidenhain**, *Versuche und Fragen zur Lehre von der Lymphbildung, Pflüger's Archiv, Bd. 49, 1891. —* **H. J. Hamburger**, *Untersuchungen über die Lymphbildung insbesondere bei Muskelarbeit, Zeitschr. f. Biol. Bd. 30, 1893. —* **E. H. Starling**, *Contribution to the physiology of lymphsecretion, Journal of physiol. Bd. 14, 1893. —* **Derselbe**, *The influence of mechanical factors on lymphproduction, Journ. of physiology Bd. 16, 1894. —* **Derselbe**, *On the mode of action of lymphagogues, Journal of physiol. Bd. 17, 1894. —* **W. Cohnstein**, *Weitere Beiträge zur Lehre von der Transsudation und zur Theorie der Lymphbildung, Pflüger's Arch. Bd. 59, 1894. —* **Derselbe**, *Ueber die Theorie der Lymphbildung, Pflügers Archiv Bd. 63, 1896. —* **L. Asher und A. A. Barbèra**, *Untersuchungen über die Eigenschaften und die Entstehung der Lymphe, 1. Mitt., Zeitschr. f. Biol. Bd. 36, 1897. —* **Derselbe und K. Kusmine**, *VI. Mitt., Zeitschr. f. Biol. Bd. 46, 1904. —* **Derselbe**, *Untersuchungen über die physiologische Permeabilität der Zellen, Biochem. Zeitschrift Bd. 14, 1908.*

L. Asher.

Lyonnet

Pierre.

Geboren am 22. Juli 1707 in Maestricht; gestorben am 10. Januar 1789 im Haag. Er war zum Geistlichen bestimmt, wurde dann aber Jurist. Aus Liebhaberei wandte er sich schon sehr früh der Naturwissenschaft zu, namentlich der Entomologie. Er hat sich längere Zeit mit der Naturgeschichte, namentlich der Färbung der Insekten aus der Umgebung des Haag beschäftigt; diese Studien sind indessen nicht veröffentlicht. Um 1740 begann er, seinem Freunde Abraham Trembley, der gerade sein berühmtes Werk über den Süßwasserpolypen verfaßte, beim Zeichnen der vorzüglichen Tafeln dieses Buches zu helfen. Die letzten acht Tafeln der Memoires pour servir a l'histoire d'un nouveau genre de Polypes d'eau douce (1744) sind vollständig von Lyonnet gestochen. Ermutigt durch diese Erfolge, wandte er sich dem selbständigen Studium eines Forstschädlings Phalaena cossus zu. Das Resultat dieser Arbeit war ein Werk betitelt Traité anatomique de la Chenille qui ronge le bois du Saule La Haye 1740 1762 4⁰. Lyonnet's Kunst des Entwerfens von Tafeln haben seinerzeit viele Forscher benutzt, um ihre Werke mit Kupfern von seiner Hand zu illustrieren. Auch als Sammler war er tätig, von Wert war namentlich seine Muschelsammlung.

Literatur. *Nouvelle Biograph. génér. Bd. 31 u. 32, Paris 1860.*

W. Harms.

M.

Maare.

Maare sind sozusagen embryonale Vulkane, bei denen die vulkanische Tätigkeit mit einer einzigen Gasexplosion erschöpft ist. Es wird dadurch ein trichterförmiges Loch aus dem Boden ausgeblasen, um dessen Rand ein Teil des ausgeblasenen Materials aufgeschichtet wird, während ein anderer Teil in die Explosionsröhre zurückfällt. Der Trichter füllt sich meist mit Wasser. Verbreitung z. B. in der Eifel, Auvergne, Südafrika, Stiele davon weit verbreitet in Schwaben (siehe den Artikel „Vulkanismus").

Mac Laurin
Colin.

Geboren Februar 1698; gestorben am 17. Juni 1746. 1717 wurde er Professor in Aberdeen, 1725 Professor in Edinburg. Als die Rebellen 1745 Edinburg bedrohten, beteiligte er sich tatkräftig am Barrikadenbau und an der Verteidigung der Stadt, nach Einnahme derselben floh er. Nach dem Tode von Newton unternahm Mac Laurin mit dessen Neffen Conduitt 1728 eine Gesamtausgabe von Newtons Werken, eine Arbeit, die durch Conduitts Tod unterbrochen wurde.

E. Drude.

Mächtigkeit.

Der bergmännische Ausdruck für die Dicke der Gesteinsschichten (siehe den Artikel „Schichtung").

Magen.

1. Anatomie und Histologie: a) Der Magen. b) Der Magen des Menschen. c) Der Magen der Tiere. d) Einteilung der Tiermägen. 2. Der Magensaft: a) Gewinnung. b) Zusammensetzung. 3. Die Absonderung des Magensaftes: a) Bildung des Magensaftes und Herkunft seiner Bestandteile. b) Sekretionsreize und Innervation. c) Einfluß der Nahrung auf die Absonderung. 4. Die Wirkungen des Magensaftes: a) Wirkung des Magensaftes auf Eiweißkörper: α) Das Pepsin und seine Wirkung; β) Das Chymosin (Labferment) und seine Wirkung. b) Wirkung des Magensaftes auf Fette. c) Wirkung des Magensaftes auf Kohlenhydrate. d) Selbstverdauung des Magens. 5. Mechanik des Magens: a) Geschichtliches. b) Die Bewegungen des Magens. c) Die Beeinflussungen der Magenbewegungen durch verschiedene Reize. d) Mechanik der Getränkaufnahme. e) Anfüllung des Magens und Bewegungen des Mageninhaltes. f) Entleerung des Magens. g) Innervation der Magenbewegungen. h) Das Erbrechen. 6) Ueberblick über die Besonderheiten in den Leistungen des Magens in der Tierreihe: a) Besonderheiten in bezug auf Zusammensetzung und Sekretion des Magensaftes. b) Besonderheiten bezüglich der Mechanik: α) Mechanik des zweihöhligen Hamstermagens. β) Mechanik des Wiederkäuermagens. γ) Mechanik des Vogelmagens. 7. Die Bedeutung des Magens für die Verdauung. Ueber die Verdauungsvorgänge im Magen vgl. den Artikel „Verdauung".

1. Anatomie und Histologie. 1a) Der Magen. Als Magen (Ventriculus, Gaster) bezeichnet man den zwischen Dünndarm und Speiseröhre eingeschalteten Abschnitt des Verdauungsschlauches. Scharf charakterisiert ist der Magen durch seine hauptsächlichsten physiologischen Funktionen. Danach ist der Magen:

1. Der Ort, an dem die aufgenommene Nahrung längere Zeit lagert, ehe sie in den Darm eintritt.

2. Der Ort, an dem die Nahrung ihre erste gründliche chemische Verarbeitung erfährt. Hauptsächlich wird diese von einem von den drüsenführenden Schleimhautpartien des Magens abgesonderten spezifischen Sekret, dem Magensaft, bewirkt.

Es ist klar, daß die genannten Funktionen von einem in der verschiedensten Weise geformten und ausgebildeten Organ erfüllt werden können. Die Form, die vom physiologischen Standpunkte als einfachste Magenform zu bezeichnen wäre, würde eine an die

Speiseröhre anschließende, mit Magensaft produzierenden Drüsen ausgestattete sagittale Erweiterung des Digestionstraktus sein, die durch Größe, Länge usw. befähigt wäre, die aufgenommene Nahrung längere Zeit zu beherbergen. Diese physiologische Grundform findet man bei gewissen Fischen (Fig. 1), Reptilien, Amphibien und sogar bei einigen niedrigstehenden Säugetieren (Pinnipedier, Robben). An diese einfachsten Verhältnisse schließen sich eng die Mägen des Menschen, vieler Carnivoren usw. an, die aber stärkere Erweiterungen, meistens in Form von Quersäcken, darstellen.

Oes. D. Pyl.

Fig. 1. Magen vom Hecht (n. Oppel).

1b) Der Magen des Menschen. Der Magen des Menschen (Fig. 2) ist ein nur in seinem dem Darm benachbarten Teil gekrümmter Sack, der in der Regio epigastrica zum größten Teil in der linken Körperhälfte liegt. In den obersten sich bis in den Brustkorb erstreckenden Teil mündet die Speiseröhre (Oesophagus) ein. Die Mündung heißt Cardia, Magenmund. Von hier erstreckt sich der Magen, links und nahezu parallel der Medianebene liegend, beckenwärts und biegt dann nach rechts zum Ausgang nach dem Darm, dem Pförtner (Pylorus), um, der meist rechts der Medianebene gelegen ist. Am Magen selbst unterscheidet man die kleine und die große Krümmung (Curvatura minor und major) und zwei Flächen. Der benachbart der Einmündung der Speiseröhre gelegene gewölbte Teil wird Magengrund, Fundus ventriculi genannt, der dem Magenausgang benachbarte Teil Pars pylorica und seine Höhle Antrum pylori.

Die Magenwand zerfällt in drei Schichten; diese sind von außen nach innen 1. die seröse Haut, 2. die Muskelhaut, 3. die Schleimhaut.

Die Muskelhaut zerfällt wieder in verschiedene Schichten, die, wie vergleichende Studien (Ellenberger) ergaben, bei den verschiedenen Tierarten verschieden in Ausbreitung und Anordnung sind. Beim Menschen unterscheidet man, außer einer äußeren unbedeutenden Längsfaserschicht eine sich über den ganzen Magen erstreckende Kreisfaserschicht und eine unter dieser liegende schiefe Schicht, die sich nur in der Nähe des Mageneinganges findet und dort die den Sphinkter cardiae verstärkende Cardiamuskelschleife (hufeisenförmige Schlinge) bildet.

Die Drüsenschleimhaut des Magens ist mit Zylinderepithel bedeckt und enthält vereinzelte Lymphknötchen. Sie weist ferner trichterförmige oder zylindrische Vertiefungen auf, die nach der Magenregon und auch der Tierart verschieden tief und zahlreich sind und Magengrübchen (Foveolae gastricae) genannt werden. Sie werden ebenfalls vom Magenepithel ausgekleidet.

Die Magenepithelzellen zeigen in ihrer basalen Zone, in der auch der Kern liegt, eine

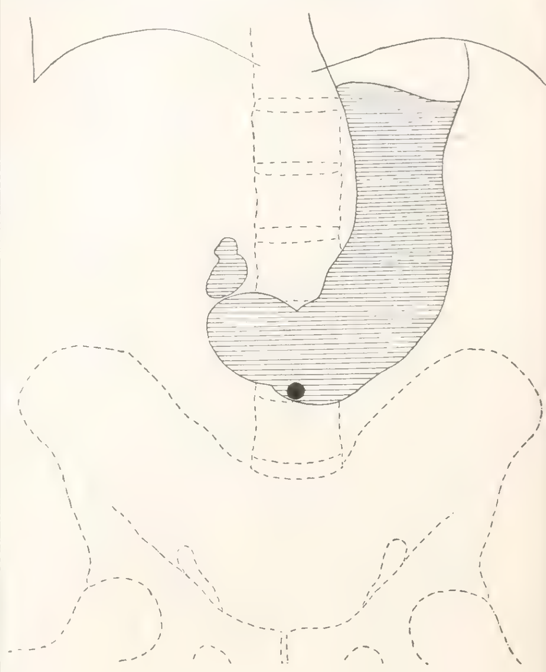


Fig. 2. Röntgenaufnahme des gefüllten Magens eines aufrecht stehenden Mannes. Originalaufnahme von Professor Rieder in München. Der mit einer für Röntgenstrahlen undurchlässigen Mahlzeit gefüllte Magenteil ist schraffiert gezeichnet. In dem oberen teilweise in dem Brustkorb liegenden Teil des Magens befindet sich für Röntgenstrahlen durchlässiger Inhalt, Speichel usw. und Gase (Magenblase). Der schwarze Punkt zeigt den Ort des Nabels an. Der Pylorus ist geschlossen, hinter ihm sieht man ein Stück des mit Kontrastmahlzeit gefüllten Zwölffingerdarmes.

feine Körnelung; in ihrem dem Mageninneren zugewandten Teile, dem Oberende, finden sich Schleimgranula.

In die Magengrübchen münden die Magendrüsen, von denen drei Arten (sämtliche tubulösen Baues) bekannt sind und deren Namen nach den Orten gebildet sind, an denen sie zuerst beim Menschen gefunden worden sind. Sie heißen: die Cardiadrüsen, die Fundusdrüsen, und die Pylorusdrüsen. Jede Drüsenart kommt nur allein auf einen bestimmten Schleimhautbezirk beschränkt vor. Man unterscheidet infolgedessen: die Fundusdrüsenzone, die Pylorusdrüsenzone und die allerdings dem Menschen fehlende Cardiadrüsenzone

Cardiadrüsen. Der menschliche Magen enthält keine Cardiadrüsenzone, da sich in seiner Schleimhaut nur vereinzelte Paketchen solcher Drüsen in der nächsten Nähe der Cardia vorfinden. Bei den Fleischfressern ist es ähnlich, hingegen sind zahlreiche andere Tierarten (vgl. unten) mit Mägen, die teilweise sehr große Cardiadrüsenzonen besitzen, ausgerüstet; z. B. die Schweinerassen, bei denen fast die ganze cardiaseitige Magenhälfte solche Cardiadrüsenschleimhaut enthält.

Die Cardiadrüsen (Fig. 3) sind stark verästelte aufgeknäulte Drüsen mit kurzem, seröse Zellen enthaltenden Drüsenkörper, langem Ausführungsgang (mit mucösen und seromucösen Zellen) und weitem Lumen.

Die Fundusdrüsen oder Magensaftdrüsen (Fig. 4) sind relativ wenig verästelt und durch zwei charakteristische Zellarten, die Hauptzellen und Belegzellen ausgezeichnet.

Die Hauptzellen sind kubische bis zylindrische Zellen, die mit großen lichtbrechenden Körnchen (Sekretgranula) gefüllt erscheinen und einen an der Zellbasis liegenden runden Kern besitzen. Zwischen ihnen verlaufen Sekretkapillaren zum Drüsenlumen. Die erheblich größeren und deutlicheren Belegzellen (Lab-, Pepsinzellen) haben ihren Namen dadurch erhalten, daß sie in der Regel nicht zwischen und neben den Hauptzellen sondern ihnen von außen anliegen. Sie enthalten nur kleine Granula und besitzen einen runden meist im Zentrum liegenden Kern und werden von zahlreichen Sekretkapillaren durchzogen, die nur selten mit dem Drüsenlumen, meist mit den zwischen den Hauptzellen verlaufenden Sekretkapillaren in Verbindung stehen.

Die Pylorusdrüsen (Fig. 5) sind stärker verästelt als die Fundusdrüsen und enthalten kubische oder stumpfkegelförmige Zellen mit großen Granula, die aber dennoch kleiner als die Granula der Hauptzellen sind. Der Kern liegt basal und ist abgeplattet. Die Zellen unterscheiden sich von den Hauptzellen besonders durch ihren Schleimgehalt.

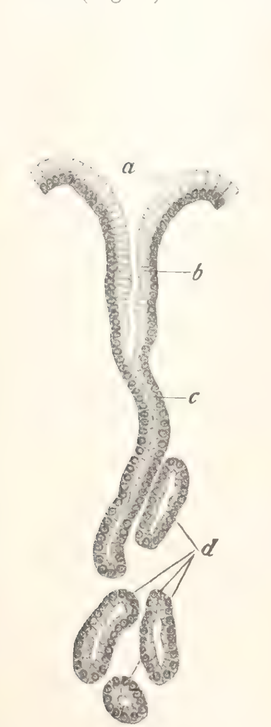


Fig. 3. Cardiadrüse vom Schwein. Nach Ellenberger. a Oberflächenepithel, b Magengrübchenepithel, c Epithel des Ausführungsganges, d Drüsenendstücke.

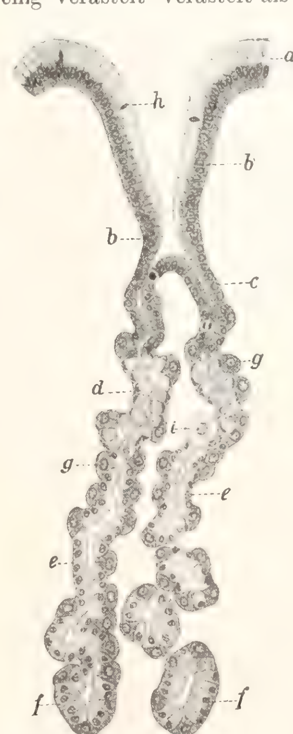


Fig. 4. Fundusdrüse vom Hund. Nach Ellenberger. a Oberflächenepithel, b Epithel der Magengrübchen, c Epithel des Mündungsteils, d Nebenzellen (Zwischenstück, Schaltteil), ef Hauptzellen, g Belegzellen, h Leukozyten, i Ungefärbte Belegzellen.



Fig. 5. Pylorusdrüse. Nach Ellenberger. a Oberflächenepithel, b Magengrübchenepithel, c Epithel des Ausführungsganges, d Drüsenendstücke, e Stöhrsche Zelle.

1c) Der Magen der Tiere. Einen

Magen, der, wie der menschliche Magen, der anfangs definierten physiologischen Grundform nahestehend, nur mit Drüsenschleimhaut ausgestattet ist, bezeichnet man als reinen, einfachen Drüsenmagen. Nicht alle Tierarten besitzen einen solchen, vielmehr lehrt die vergleichende Anatomie, daß bei zahlreichen Tierarten das als Magen bezeichnete Organ hiervon und damit auch von der physiologischen Grundform ganz wesentlich verschieden ist und dieses sowohl was Form als auch inneren Ausbau anlangt.

Zu einem Verständnis der Beziehungen verschiedener Magenformen zueinander und ihres Auftretens bei den verschiedenen Tierarten führt das vergleichende Studium der physiologischen Funktionen der Mägen. Dieses zeigt, daß die Form und Einrichtung des Magens den Aufgaben entspricht, die er bei der Ernährung des Tieres zu erfüllen hat. Die Aufgaben sind abhängig in erster Linie von den Nahrungsmitteln, in zweiter von den sonstigen Einrichtungen des Verdauungsapparates. Der Einfluß der Nahrungsmittel hängt ab von ihrer Zusammensetzung, d. h. von ihrem Gehalt an leicht, schwer oder unverdaulichen Bestandteilen und der den normalen Bedürfnissen des Tieres entsprechenden Nahrungsmenge.

a) Einfluß der Verdaulichkeit der Nahrungsmittel. Leicht verdauliche Kost (animale und cellulosearme, gutgekaute, zubereitete pflanzliche) setzt der Verarbeitung im Magen nur geringe Schwierigkeiten entgegen. Daher besitzen von solcher Kost lebende Tierarten meist einfache einhöhlige reine Drüsenmägen. Schwerverdauliche besonders cellulosereiche pflanliche Nahrung bedarf zu ihrer Verarbeitung im Magen dreier Bedingungen. Diese sind:

1. Längere Lagerung. Daher finden sich geräumige Mägen mit Poschen, Blindsäcken, Ausbuchtungen, mehreren Abteilungen, die ein rasches Vorwärtsschreiten verhindern und die Aufnahme größerer Massen nährstoffarmer Nahrungsmittel ermöglichen.

2. Gute Zerkleinerung. Daher finden sich Warzen, Papillen, Blätter, die zerreibend wirken, Kaumägen, Muskelmägen, Vorrichtungen zum Wiederkauen.

3. Intensive chemische Verarbeitung. Daher Ausbildung geräumiger Aussackungen, in denen bakterielle Vorgänge der eigentlichen Verdauung vorarbeiten können oder Ausbildung akzessorischer Drüsenmägen und damit Vermehrung der Magensaftquellen.

b) Die sonstigen Einrichtungen des Verdauungsapparates können die Ausbildung des Magens insofern modifizieren, als er durch sie teilweise entlastet wird oder, wenn ihre Funktionen ungenügend sind, diese mit übernehmen muß. So besitzen die Einhufer einen relativ kleinen, einhöhligen Magen, trotzdem sie im großen und ganzen ihre Nahrung mit den Wiederkäuern teilen, deren Magen mit seinen vier Abteilungen die größte Kompliziertheit aufweist. Dafür haben die Einhufer einen außerordentlich großen und geräumigen Enddarm, während der der Wiederkäuer weniger mächtig ist. Die körnerfressenden Vögel (Fig. 37), die ihre Nahrung unzerkleinert verschlingen, besitzen Muskelmägen (Kaumägen), deren Tätigkeit das Kauen ersetzt und Kröpfe, in denen eine Erweichung, Mazeration usw. stattfindet. Aehnliche Einrichtungen finden sich an den Mägen der Delphiniden, der Schuppentiere, Faultiere u. a.

Die Anpassung an diese zahlreichen Forderungen hat verschiedene Veränderungen in bezug auf Größe, Form und innere Einrichtung zur Folge. Neben Mägen, die der physiologischen Grundform ziemlich nahe kommen, erscheinen andere als mehr oder weniger gekrümmte Säcke, zum Teil mit Ausbuchtungen, Blindsäcken u. dgl. Wieder andere weisen eine deutliche Teilung auf, so daß sie aus 2, 3 oder auch 4 untereinander kommunizierendem Säcken oder Abteilungen bestehen können. Man unterscheidet in dieser Hinsicht einhöhlige und mehrhöhlige Mägen.

Ebensolche Mannigfaltigkeit herrscht bezüglich der inneren Einrichtungen. Während die einen ganz mit Magensaft produzierender Drüsenschleimhaut ausgekleidet sind, sind in anderen mehr oder weniger große Partien mit drüsenfreier kutaner Schleimhaut oder einer drüsenhaltigen Schleimhaut bedeckt, deren Drüsen aber keinen Magensaft bilden. Ferner können Einrichtungen getroffen sein, die, sei es durch die mächtige Entwickelung der Muskulatur, sei es durch Ausrüstung mit Papillen, Warzen, Blättern, Leisten u. dgl. dem betreffenden Magenabschnitt zu mechanischen Verrichtungen befähigen.

Bei einem derartig kompliziert gebauten Magen entspricht der physiologischen Grundform der mit Fundus- und Pylorusdrüsenschleimhaut bedeckte Teil; er ist der eigentliche Magen, der Drüsenmagen oder Hauptmagen. Die anderen Teile sind Nebenmägen oder Nebenmagenabteilungen. Sind dieselben proximal vom Drüsenmagen angeordnet, so sind es Vormägen, Vormagenabteilungen; liegen sie distal, so wird man folgerichtig von Nachmägen sprechen können.

1d) Schematische Einteilung der Mägen. Um einen Ueberblick über die verschieden gestalteten Mägen zu gewinnen, ist es zweckmäßig, sie in ein System einzuordnen, wenn ein solches auch keineswegs einen vollständigen Ueberblick zu geben vermag, da die Mannigfaltigkeit eine zu große ist. Das folgende System schließt sich eng an das von Ellenberger auf Grund vergleichend anatomischer und histologischer Untersuchungen aufgestellte an und bezieht sich nur auf die Säugetiere. Die Abbildungen sind zum größten Teil nach Oppel, „Lehrbuch der mikroskopischen Anatomie“ (Jena 1896. Bd. 1 Magen) gezeichnet.

I. Einhöhlige Mägen.

1. Ohne Cardiadrüsenregion und ohne kutane Schleimhautzone: Mägen, die der physiologischen Grundform nahe stehen, sagittale Mägen (Phocarien, Seehunde, Robben, Walroß Fig. 6) und Quersackmägen mit Vergrößerung der Magensaftquellen. Carnivoren (Fig. 7), Insektivoren (Igel Fig. 8, Maulwurf) die meisten Nager (Hase, Kaninchen, Eichhörnchen, Meerschweinchen), Chiroptera (Fledermäuse Fig. 9), einige Beuteltiere (Phalangista Fig. 10), die meisten Halbaffen und Affen sowie der Mensch.

2. Mit Cardiadrüsenregion aber ohne kutane Schleimhautzone: Einige Beuteltiere (Opossum, Dasyurus).

3. Mit kutaner Schleimhautzone und Cardiadrüsenzone: Perissodaktyla (Pferd Fig. 11, Esel, Zebra, Tapir, Rhinozeros), einige Nager (Ratte, Maus Fig. 12), Schwein (Fig. 13), einige Beuteltiere (Känguruh Fig. 14), einige Edentaten (Schuppentier Fig. 15).

II. Mehrhöhlige Mägen.

Der eigentliche Drüsenmagen ist mit Anhangssäcken versehen und zwar:

1. Mit drüsenfreien Säcken mit kutaner Schleimhaut: Hamster (Fig. 16), Tylopoden, Ruminantier (Fig. 17), Hippopotamus (Fig. 18), Lama etc., Dicotyles (Peccari Fig. 19).

2. Mit drüsenhaltigen und drüsenfreien oder nur drüsenhaltigen Säcken (Fig. 20): Einige Edentaten, (z. B. Bradypus, Faultiere Fig. 21), Cetaceen (Walfische Fig. 22, Delphin Fig. 23), Manatus (Seekuh Fig. 24), Dugong.

Magenschemata verschiedener Säugetiere.



Fig. 6. Walroß.

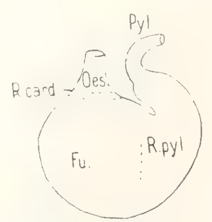


Fig. 7. Hund.

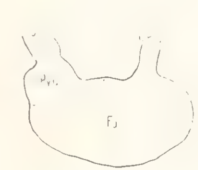


Fig. 8. Igel.

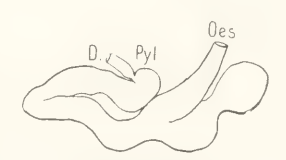


Fig. 9. Vampyr.

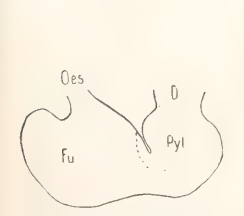


Fig. 10. Phalangista (Beuteltier).

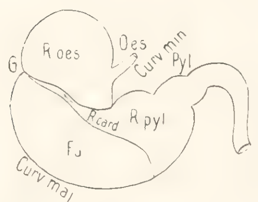


Fig. 11. Pferd.

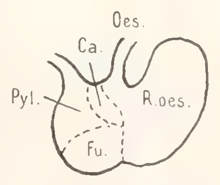


Fig. 12. Maus.

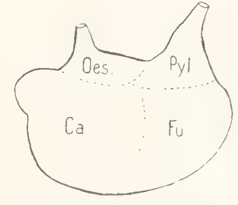


Fig. 13. Schwein.

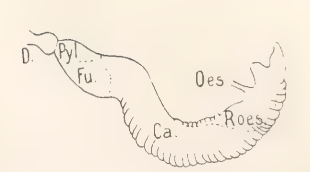


Fig. 14. Känguruh.

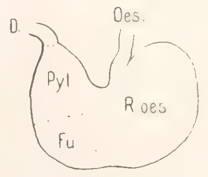


Fig. 15. Langschwänziges Schuppentier.

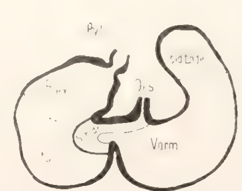


Fig. 16. Hamster.

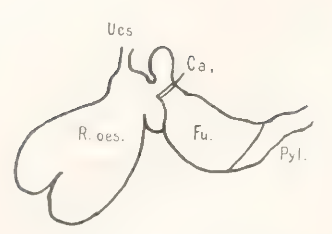


Fig. 17. Wiederkäuer.

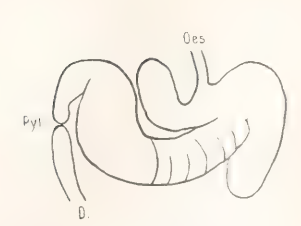


Fig. 18. Hippopotamus.

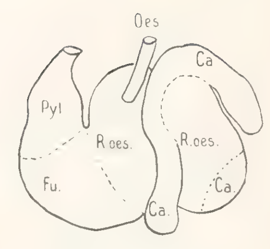


Fig. 19. Peccari.

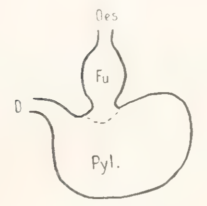


Fig. 20. Siebenschläfer.

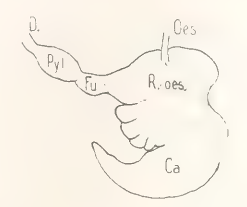


Fig. 21. Dreizehiges Faultier.

Oes.
D.
R. oes
Fu
Pyl.
Fig. 22. Grindwal.

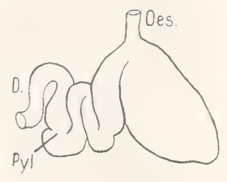


Fig. 23. Delphin.

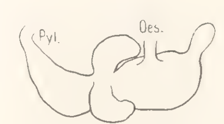


Fig. 24. Seekuh.

Oes, Oesophagus, Speiseröhre. R.oes. mit kutaner Schleimhaut bedeckte Magenabteilung. Ca, R.card. Cardiadrüsenzone. Fu Fundusdrüsenregion. Pyl. im Innern der Figur=R.pyl. Pylorusdrüsenzone. Pyl. außerhalb der Figur=Pylorus, Pförtner, Magenausgang. D Darm, Schldr. Schlundrinne. Vorm. Vormagen.

Die schematische Darstellung zeigt die Kompliziertheit der Verhältnisse, die sich durch Einordnung der anderen Wirbeltiere noch mehr erhöhen würde.

Unter den Vögeln zeigen z. B. besonders die granivoren Arten zum Teil eine eigenartige Umbildung der Regio pylorica ihres Magens zu einem Muskel- oder Kaumagen (vgl. S. 556).

Von den Fischen besitzen einige, wie erwähnt, Mägen, die der physiologischen Grundform nahekommen (Selachier, Ganoiden, einige Teleostier), zum Teil haben sie eigenartige Ausstülpungen am Magenausgange, die sogenannten Pylorusanhänge, die vielleicht, wenigstens bei einigen Arten als nachmagenartige Bildungen angesehen werden könnten. Andere Fischarten (Amphioxus, Cyprinoiden, Cyklostomen) haben keinen eigentlichen Magen. Bei ihnen mündet die Speiseröhre direkt in den Darm dicht vor dem Eingang des Gallenganges.

Bei den Wirbellosen kommen, soweit eine extrazelluläre Verdauung stattfindet (wie dies bei allen Metazoen der Fall sein dürfte) und ein dem Darmkanal analoger Apparat vorhanden ist (der z. B. einigen Cestoden fehlt), Organe vor, die man dem gewöhnlichen Sprachgebrauch zufolge als Magen bezeichnet. Ob ein solches Organ vom physiologischen Standpunkte aus als Magen angesehen werden darf, kann nur von Fall zu Fall durch Untersuchung seiner Funktionen entschieden werden.

2. Der Magensaft. 2a) Gewinnung. Reiner Magensaft kann nur mit Hilfe der von Pawlow (Ergebn. d. Physiol. Biochem. Abt. 1902) und seinen Schülern nach dem Vorgange von Heidenhain ausgebildeten operativen Methoden gewonnen werden. Ehe diese Methoden ausgebildet waren, ist wirklich reiner, d. h. durch Speichel oder Mageninhalt nicht verunreinigter Magensaft nie mit Sicherheit gewonnen worden. Die Analysen solcher Säfte sind also nicht einwandfrei. Zwei exakte Methoden kommen in Frage:

1. Die Magenfistel in Verbindung mit der Oesophagotomie (Fig. 25), wobei das proximale Oesophagusende in die äußere Haut eingenäht wird, so daß bei der Fütterung die abgeschluckten Massen nach außen gelangen (Scheinfütterung Pawlow und Schoumow-Simanowsky, Ztrbl. f. Phys. 1889). Der hierbei auf reflektorischem Wege sezernierte psychische Magen-

saft fließt durch die Magenfistel (Kanüle) nach außen.

2. Der Magenblindsack (Fig. 26). Ein Teil des Magens, dessen Sekretion zu untersuchen beabsichtigt ist, wird unter

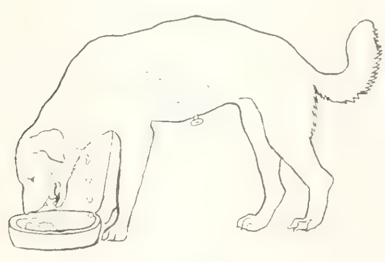


Fig. 25.

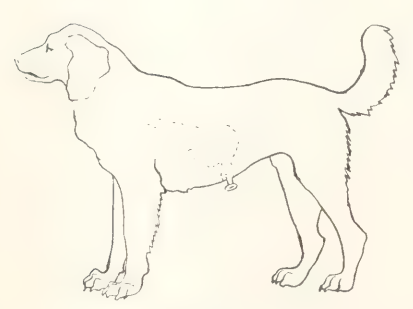


Fig. 26.
Nach Abderhalden's Lehrb. d. phys. Chem.

Schonung aller nervöser und blutführender Verbindungen vom übrigen Magen getrennt und aus ihm ein Säckchen geformt, dessen Oeffnung sich in der Bauchwand befindet. Der Magenrest wird geschlossen. Man erhält so einen „kleinen Magen", der nach außen offen ist, dessen Sekret aufgefangen werden kann und der mit dem übrigen Magen, durch den die Nahrung wie gewöhnlich ihren Weg nimmt, noch völlig bezüglich Innervation und Blutversorgung zusammenhängt.

2b) Zusammensetzung des Magensaftes. Der Magensaft ist das gemischte Sekret der Drüsen und des Oberflächenepithels der Magenschleimhaut. Er ist eine klare wasserhelle, sauer reagierende und schmeckende, geruchlose Flüssigkeit, die infolge ihres Eiweißgehaltes beim Schütteln leicht schäumt. Das spezifische Gewicht schwankt nur in engen Grenzen (Mensch 1,0083 bis 1,0085 Sommerfeld Bioch. Z. IX, 1908; Hund 1,003 bis 1,009; Ziege 1,006 Grosser). Der Gefrierpunkt zeigt in verschiedenen Portionen reinen Magensaftes, auch wenn sie während einer Sekretionsperiode gewonnen worden sind, keine Uebereinstimmung, doch erweist er sich unabhängig von der Nahrung. Der Magensaft kann auf Blut bezogen sowohl hypotonisch und isotonisch als auch hypertonisch sein. Aenderungen, die bis zu 0,5° betragen können, treten oft plötzlich ein. Auch ist der Gefrierpunkt des bei Scheinfütterung gewonnenen Saftes verschieden von dem des Blindsacksekretes.

Die elektrische Leitfähigkeit ist ebenfalls inkonstant und wechselnd, ohne etwa mit dem Gefrierpunkt zu harmonieren (Bickel, Fraenkel).

Die anorganischen Bestandteile des Magensaftes sind in erster Linie Chloride von K u. Na, neben ihnen kommen noch sehr geringe Mengen von NH_4Cl und bei Mensch und Hund Spuren von Rhodanalkali vor. In der Asche finden sich ferner kaum mehr als spurenweise PO_4''', SO_4'', Ca, Mg. Ferner findet sich als wichtigster Bestandteil freie Salzsäure, die als einzige Säure die saure Reaktion bedingt. Außerdem beteiligen sich an ihrem Zustandekommen noch sauer reagierende Verbindungen der HCl mit den Eiweißkörpern des Magensaftes, doch beeinflußt deren Menge die Gesamtacidität kaum.

Obwohl schon 1824 Prout die Magensaftsäure als HCl ansprach, erbrachte erst 1852 C. Schmidt den einwandfreien analytischen Beweis durch gleichzeitige quantitative Analyse aller Basen und Säuren, wobei sich ein Ueberschuß an Cl ergab. Damit wurden die anderen Theorien, die Milchsäure oder Phosphorsäure annahmen, hinfällig.

Der Prozentgehalt des Magensaftes an Salzsäure verschiedener Tierarten ist verschieden (Hund 0,5 bis 0,6%; Mensch 0,4 bis 0,5%; Ziege 0,044%), bei jeder Tierart besteht hingegen eine ziemliche Konstanz, so daß stets ein Saft von annähernd gleicher Acidität abgesondert wird (Pawlow, Rosemann, Pflüg. Arch. 118, 1907). Hiermit steht die Abnahme der Magensaftmenge bei Chlorhunger im Einklang (vgl. 3a).

Die organischen Bestandteile bestehen in erster Linie aus einem komplizierten, bei Siedehitze gerinnbaren, durch Kälte und Alkohol fällbaren Gemenge von Eiweißkörpern, die den Nukleoproteiden nahestehen (Spaltprodukte: Albumosen, Lecithin, Pentosen, Nukleine nach Nencki und Sieber) und auch Chlor enthalten. Vielleicht stehen sie in Beziehung zu den Fermenten des Magensaftes, die seine physiologische Funktion bedingen. Es sind dies Pepsin (proteolytisch), Chymosin (Labferment), Magenlipase (lipolytisch).

Quantitative Analysen reinen Magensaftes sind bisher selten ausgeführt worden.

	Ziege (Grosser)
Trockensubstanz	1,14 %
Asche	0,84 „
Organische Substanzen	0,30 „
Gesamt-HCl	0,04 „
Gesamt-N	0,053 „
Nichtprotein-N	0,039 „

	Hund (Schoumow-Simanowsky)
Säure	0,46—0,56 %
Chlor	0,49—0,62 „
Trockensubstanz	0,43—0,60 „
Asche	0,09—0,16 „
d. Alkohol gerinnbar	0,14—0,19 „
beim Kochen gerinnbar	0,13—0,18 „
bei 0° ausfallend	0,11—0,003 „
Phosphorsäure	0,004 %

Die Menge des Magensaftes ist nicht sicher zu beurteilen, jedenfalls aber sehr beträchtlich. Beim Menschen muß man pro Tag 1½ Liter annehmen.

3. Die Absonderung des Magensaftes. 3a) Bildung des Magensaftes und Herkunft seiner Bestandteile (vgl. auch den Artikel „Sekretion"). Hier sei nur kurz folgendes erwähnt: Die spezifischen Bestandteile des Magensaftes werden durch Eigentätigkeit der Zellen der Magendrüsen gebildet, die die hierzu nötigen Materialien dem Blute entnehmen. Sämtliche Bestandteile des Magensaftes bilden sicher nur die Fundusdrüsen, deren Sekret wasserreich (etwa 99%) ist und sämtliche Enzyme sowie HCl enthält, weshalb sie auch mit Recht Magensaftdrüsen genannt werden. Die Pylorusdrüsen liefern einen schleimigen, alkalischen, Pepsin und Lab-haltigen, aber Lipase freien (Volhard) Saft (sp. Gew. 1,009 bis 1,01, feste Stoffe 1,05 bis 2,05%. Klemensiewicz). Pepsin und Lab sind darin in geringerer Menge als in dem Fundusdrüsensaft enthalten. Die Cardiadrüsen, deren Vorkommen in größerer Anzahl auf gewisse Tierarten beschränkt ist (vgl. oben), liefern ein schleimiges, alkalisches Sekret, welches vermutlich nur ein schwaches diastatisches Ferment enthält (Ellenberger). Das Oberflächenepithel sondert nur Schleim ab.

Die Wassersekretion wird demnach wesentlich von den Fundusdrüsen besorgt und ebenso ist die Bildung der HCl auf diese Drüsen beschränkt. Man nimmt, allerdings ohne zwingende Beweise allgemein an, daß die Belegzellen die Salzsäureproduzenten sind. Ihr Sekret bildet sich auch durch Zusammenfließen der in ihnen enthaltenen Sekretgranula, deren Zahl auch bei starker Sekretion nicht abzunehmen scheint, da sich immer wieder neue bilden, eine Tatsache, die mit der beständigen Anwesenheit eines ziemlich konstanten prozentualen HCl-Gehaltes wohl vereinbar wäre.

Die HCl wird aus den Chloriden des Blutes, letzten Endes also der Nahrung gebildet, bei Mangel an solchen, wie er infolge chlorfreier Nahrung eintritt, verschwindet die Salzsäure aus dem Magensaft (Cahn, Wohlgemuth, Rosemann). Von dem Gesamtchlorgehalt des Körpers können zur Magensaftbildung nur etwa 20% herangezogen werden (Rosemann, Pflüg. Arch. Bd. 142, 1911). Der Chemismus des Vorganges ist unbekannt, die darüber bestehenden Theorien (Maly, Schwarz, Koeppe) durchgängig unbefriedigend (vgl. Hammarsten, Physiolog. Chem. 1910, S. 448).

Die Bildung von Pepsin und Labferment wird in die Hauptzellen verlegt (Heidenhain, Langley), obwohl eine Beteiligung der Belegzellen nicht absolut ausgeschlossen erscheint. Für die Beteiligung der Hauptzellen an der Pepsinbildung sprechen verschiedene Tatsachen: z. B. werden beim Einlegen in verdünnter HCl die Hauptzellen rasch verdaut, die Belegzellen nicht. Das Auftreten von Pepsin im Magen ist an das Auftreten von Hauptzellen gebunden. Der Pepsinreichtum geht proportional mit dem Reichtum an Hauptzellen und ihrer Füllung mit Sekretgranula.

In diesen großen lichtbrechenden Körnchen sind die Vorstufen der Fermente zu erblicken. Im nüchternen Zustande (Fig. 27a)

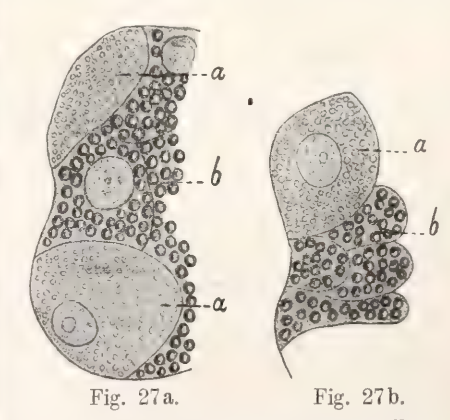


Fig. 27a. Fig. 27b.

Fig. 27a. Hauptzellen und Belegzellen der Fundusdrüsen des Hundemagens in Ruhe (Noll und Sokoloff). a Belegzellen mit kleinen Granula. b Hauptzellen mit großen Granula. Fig. 27b. Desgleichen während der Sekretion. Zehnte Verdauungsstunde. a Belegzellen, trübe und verwaschen. b Hauptzellen, Granula verkleinert.

sind die Hauptzellen damit prall gefüllt und erscheinen deshalb dunkel und groß. Nach lebhafter Sekretion (Fig. 27b) nehmen die Granula an Größe und wohl auch an Zahl ab und verändern ihre tinktoriellen Eigenschaften. Die Abnahme der Zahl ist nur unbedeutend, da eine Neubildung dauernd erfolgt.

Es ist zu betonen, daß von den Zellen nicht die fertigen Fermente, sondern ihre Vorstufen, Proenzyme, Zymogene, also Pepsinogen und Prochymosin, gebildet werden. Erst durch die Berührung mit freier Salzsäure werden die Profermente in die Fermente übergeführt.

Diese Profermente können nachgewiesen werden: Durch Behandeln von Magenschleimhaut mit 0,5% Sodalösung gelingt es das Pepsin völlig zu zerstören (Langley). Extrahiert man dann mit 0,1% HCl, so erhält man von neuem ein peptisch wirksames Extrakt. Abderhalden (Z. f. phys. Ch., Bd. 71, 1911) gelang es, das Propepsin aus der Magenschleimhaut durch Elastin zu adsorbieren, Hamburger (Arch. neerland. 38, 1908) gelang dasselbe durch Agar.

Ueber die Zellen, die an der Bildung der Magenlipase beteiligt sind, herrscht noch keine Klarheit. Ist ihre Bildung auf die Fundusdrüsenregion beschränkt und sind die Hauptzellen der Fundus- und Pylorusdrüsen identisch, was ich aber nicht annehme, so müßten die Belegzellen als Bildungsort in Frage kommen. Ebensowenig, wie man die Bildungsstätte kennt, weiß man, ob das Zymogen der Lipase oder sie selbst abgesondert wird.

3b) Sekretionsreize und Innervation. Die die Absonderung des Magensaftes bewirkenden Reize sind besonders durch Pawlows Untersuchungen an Hunden näher bekannt geworden. Die Ergebnisse Pawlows sind neuerdings von zahlreichen Autoren (Hornborg, Umber Berl. klin. Woch. 1905, Bickel D. u. Münch. med. Woch. 1906, Kaznelson Pflüg. Arch. Bd. 118, 1907, Sommerfeld u. a.) an Menschen nachgeprüft und durch neue Versuche ergänzt worden. Es hat sich dabei herausgestellt, daß die an Hunden gewonnenen Erfahrungen im großen und ganzen auch für den Menschen gültig sind.

Die Absonderung wird in allererster Linie auf reflektorischem Wege veranlaßt, außerdem kann aber auch direkte Reizung der Drüsenzellen durch ins Blut gelangte Substanzen (z. B. Hormone) in Frage kommen.

In erster Linie steht die Magensaftsekretion unter der Herrschaft des N. vagus; Reizungen des peripheren Stumpfes des durchschnittenen Vagus haben Magensaftsekretion zur Folge. Der Sitz des Sekretionszentrums ist unbekannt. Außerdem gibt es aber eine vom Nervus vagus unabhängige Absonderung, denn selbst nach Durchschneidung beider Vagi gelingt es, Hunde am Leben zu erhalten (Pawlow, Katschkowsky, Pflüg. Arch. 84, 1901), bei diesen wird also noch Magensaft abgesondert und Nahrung im Magen verdaut. Ueber die nervöse Beeinflussung dieser Sekretion ist Feststehendes noch nicht bekannt, doch liegt es nahe, sie mit Ganglien, den autonomen Zentren in der Magenwand, in Verbindung zu bringen. Außer sekretorischen Fasern dürften in der Bahn des Vagus auch sekretionshemmende Fasern verlaufen, wie besonders Untersuchungen von Bickel (Sitzber. der Pr. Akad. d. Wiss. 1908) wahrscheinlich machen.

Die reflektorische Erregung der Magendrüsen kann auf verschiedene Weise erfolgen. Am wichtigsten sind die unter Mitwirkung des Großhirns ablaufenden Reizungen. Es sind dies jene, die die Absonderung des sogenannten psychischen Magensaftes oder Appetitsaftes bewirken, durch Anblick, Geruch, Geschmack der Speisen, das Behagen bei ihrer Aufnahme usw. Die große Bedeutung dieser Reize beweist der Scheinfütterungsversuch (vgl. S. 540), bei dem sehr große Magensaftmengen abgesondert werden, ohne daß die abgeschluckte Nahrung in den Magen kommt.

Psychische Erregung der Magensaftsekretion: Als erregende Momente kommen folgende in Betracht:

1. Rein psychische Vorgänge in der Großhirnrinde. Schon die intensive Vorstellung einer Mahlzeit oder die Erinnerung an eine solche rufen Magensaftabsonderung hervor.

2. Psychosensorielle Vorgänge. Die Reizung bestimmter Sinnesorgane wird reflektorisch auf die Sekretionszentren übertragen und verursacht Magensaftabsonderung. Eine solche Reizung findet durch Geruchs- und Geschmacksempfindung, sowie durch das Sehen der Speisen regelmäßig statt. Bedeutungsvoll ist, daß ein solcher Erregungsvorgang schon in frühester Jugend besteht. Bei neugeborenen Hunden veranlaßte Saugen an den Zitzen Sekretion (Cohnheim und Soetbeer). Auch Säuglinge zeigen eine psychische Sekretion beim Saugen an der Flasche, ältere schon beim Anblick der Flasche (Nothmann).

Ferner gehört hierzu die assoziative Absonderung durch die sogenannten bedingten Reflexe (Pawlow). Der von irgendeinem peripheren Sinnesorgane aufgenommene Reiz, der an sich keine Saftabsonderung hervorruft, kann durch Uebung zu einem „bedingten" Reiz werden, indem unter Auslösung psychischer Vorgänge eine Uebertragung des Reizes vom Sinneszentrum auf die Sekretionszentren statthat und zu einer assoziativen Sekretion führt. Das Sehen der die erwartete Mahlzeit bringenden Person verursacht eine solche assoziative Magensaftabsonderung. Der Ton einer Trompete, der stets ertönte, wenn einem Magenfistelknaben seine Mahlzeit gereicht wurde, verursachte Sekretion (Bogen) usw.

Von großer Bedeutung für den Erfolg

aller dieser Reize ist der allgemeine Zustand des Nervensystems. Appetit, das Gefühl des Behagens beim Genuß der Speise sind von entscheidender Bedeutung (Pawlow). Fehlen sie, so ist die Absonderung gering oder fehlt ganz. Aerger, körperlicher Schmerz, Mißbehagen, Aufregung lassen bei plötzlichem Eintreten eine schon bestehende Sekretion sistieren oder verhindern die Absonderung „psychischen" Magensaftes bei der Nahrungsaufnahme (Bickel, D. med. Woch. 1905, Sasaki).

Die soeben geschilderten psychischen Reize leiten die Sekretion der normalen Magenverdauung ein. Sie genügen aber keineswegs, um die Absonderung während des gesamten Ablaufes der Magenverdauung einer Mahlzeit zu unterhalten und die dazu nötige große Saftmenge zu liefern. Die psychische Sekretion beginnt nach einer Latenzzeit von 3 bis 5 Minuten, erreicht sehr bald ihren Höhepunkt und klingt dann ab, um nach 2 bis 3 Stunden aufzuhören. Die Verdauung einer großen Nahrungsmenge bedarf aber einer weit längeren Zeit, bis zu 8 oder 10 Stunden. Es müssen also noch andere erregende Momente vorhanden sein, die die durch die psychischen Reize eingeleitete Absonderung fortführen.

Erregung der Magensaftsekretion durch vom Magen und Darm aus wirkende Reize: Das Bestehen einer auf anderem als psychischen Wege veranlaßten Sekretion wird dadurch bewiesen, daß auch die unter Ablenkung der Aufmerksamkeit, also ohne psychische Sekretion, durch eine Fistel in den Magen gebrachte Nahrung daselbst gut verdaut wird. Allerdings setzt die Sekretion langsamer ein. Beim Menschen vergehen 30 bis 60 Minuten, dann aber steigt sie an, erreicht ihr Maximum erst nach 3 bis 5 Stunden und klingt ganz allmählich ab (Mantelli, Wien klin. Woch. Bd. 24, 1911). Verursacht wird sie durch Reize, die vom Magendarmkanal aus wirken. Als Ort der Reizung kommt nicht allein, aber in erster Linie die Magenschleimhaut in Frage und zwar sind nach der herrschenden Anschauung chemische Reize wirksam. Mechanische (Pawlow) und elektrische Reizung sollen keine Sekretion hervorrufen; nach der Ansicht zahlreicher vor allem älterer Autoren sollen allerdings mechanische Reize wirksam sein.

Auch vom Darm aus wird die Magensaftabsonderung durch chemische Reize beeinflußt, so hemmen vom Duodenum aus Fette die Sekretion außerordentlich (Lönnqvist, Skand. Arch. Phys. XVIII, 1906), während Nährklystiere bestimmter Zusammensetzung (Wasserthal, Int. Beitr. z. Path. u. Ther. d. Ernährungsstör. Bd. III, 1911) geringe Magensaftsekretion hervorrufen, besonders soll Alkohol vom Rektum aus fördernd einwirken.

Viel wichtiger sind die auf die Magenschleimhaut und besonders auf den Pylorusteil (Pawlow, Groß, Arch. f. Verdauungskr. Bd. 12. 1906) einwirkenden chemischen Reize. Durch Bestandteile des Mageninhaltes und Verdauungsprodukte (Pepton, Milch, Gärungsbestandteile, Speichel usw.), gewisse Genußstoffe (Extraktivstoffe des Fleisches, Röstprodukte, Kaffee, Kakao usw.) besonders aber auch Alkohol (der auch vom Fundus wirkt) wird die Magensaftsekretion angeregt.

Die Erregung der Sekretion von der Magenschleimhaut aus kann auf reflektorischem Wege unter Benutzung von Vagusbahnen oder der autonomen Zentren der Magenwand erfolgen. Ferner ist aber, besonders nach Untersuchungen von Bickel und seinen Schülern, auch einer direkten Erregung der Drüsenzellen durch chemische Stoffe, die in der Blutbahn zu ihnen gelangen, eine wichtige Rolle hierbei zuzusprechen. In der Pylorusdrüsenschleimhaut, aber auch in der Duodenal- und übrigen Darmschleimhaut sowie in der Leber sind Stoffe (Prosekretine) vorhanden, die bei der Extraktion mit Salzsäure in sekretionserregende Substanzen (Sekretine) übergeführt werden. (Edkins, J. of Phys. Bd. 38, 1909, Emsmann). Diese Stoffe wirken als Hormone von der Blutbahn aus stark sekretionserregend; per os gegeben sind sie nur ganz geringgradig wirksam. Auch sind in den meisten Nahrungsmitteln nicht mit den Nährstoffen identische aber leicht resorbierbare Substanzen vorhanden, die in die Blutbahn eingespritzt Magensaftabsonderung bedingen (Bickel, Int. Beitr. z. Path. u. Ther. d Ern., Bd. I/III, 1910/11, Eisenhardt). Während des Hungerns tritt eine geringe Magensekretion in zweistündigen etwa 10 Minuten dauernden Perioden ein (Boldyreff).

3c) Einfluß der Nahrung auf die Absonderung. Umfassende sorgfältige Untersuchungen der Pawlowschen Schule haben ferner dargetan, daß abgesehen von dem Allgemeinzustand des Körpers (Appetit usw.) die Menge und Zusammensetzung des Saftes sowie der Sekretionsverlauf ganz wesentlich von der Zusammensetzung der Nahrung, also der Art des Reizes abhängig ist. Jedes Nahrungsmittel veranlaßt einen spezifischen Verlauf der Absonderung. Brot veranlaßt, verglichen mit Fleisch und Milch, die längste Sekretion, den höchsten Fermentgehalt aber die geringste Acidität, Fleisch die höchste Acidität usf.

Aus solchen Versuchen und anderen, die von E. S. London (Z. f. phys. Ch. 1904 bis 11) und seinen Schülern an Hunden mit kleinen Magen und anderen Fistelhunden ausgeführt worden sind, scheinen bestimmte Gesetzmäßigkeiten zwischen Nahrungsmenge und Saftmenge, N-

Gehalt des Magensaftes und N-Gehalt des gereichten Fleisches, Nahrungsmenge und Verdauungszeit usw. hervorzugehen. Arrhenius (Medd. f. Vet. Akad. Nobelinst., Bd. 2, 1909) hat diese Resultate rechnerisch verwertet und ist dabei zur Aufstellung eines Quadratwurzelgesetzes gekommen, dem er weit verbreitete Gültigkeit zuschreibt. Bezüglich der Saftabsonderung bei gemischter Nahrung hat Arrhenius gefunden, daß die während einer bestimmten Zeit (kürzer als die Verdauungszeit) abgesonderte Menge der Quadratwurzel aus der gegebenen Nahrungsmenge proportional ist. London fand z. B., daß der N-Gehalt des Magensaftes direkt proportional der Quadratwurzel aus dem gereichten Fleischstickstoff ist.

4. Die Wirkungen des Magensaftes. Als wässerige Flüssigkeit löst der Magensaft die löslichen und vom Speichel noch nicht gelösten Bestandteile der Nahrung auf und durchtränkt den Mageninhalt. Vermöge seines Gehaltes an freier HCl und an Fermenten (Pepsin, Lab, Lipase) bewirkt er in der Nahrung ferner chemische Veränderungen, in denen die Magenverdauung, soweit sie chemischer Natur ist, besteht. Ueber den Ablauf der Magenverdauung vgl. den Artikel „Verdauung“.

4a) Wirkung des Magensaftes auf Eiweißkörper. Die nativen Eiweißkörper der Nahrung werden durch HCl und Pepsin hydrolytisch gespalten und in lösliche Verbindungen (Peptone) übergeführt. Eine Ausnahme macht das Kasein insofern, als es zunächst durch das Labferment in Parakasein verwandelt und dann erst gespalten wird, wobei aber ein gegen Pepsin und HCl widerstandsfähiges unlösliches Produkt, Pseudonuklein, zurückbleibt.

α) Das Pepsin und seine Wirkung. (Eberle, Schwann und Wassermann entdeckten zuerst einen aus der Magenschleimhaut extrahierbaren Körper, der mit verd. HCl zusammen Eiweißkörper zu lösen vermochte. 1836 nannte ihn Schwann Pepsin). Ueber die Bildung des Pepsins siehe Seite 542.

Gewinnung und Eigenschaften des Pepsins. Durch Extraktion fein zerhackter Magenschleimhaut mit verdünnter (0,1 bis 0,3 %) HCl (auch mit physiologischer Kochsalzlösung, Glyzerin usw.) wird ein wirksames Extrakt, künstlicher Magensaft, gewonnen, welches Pepsin enthält und an dem die Wirkung des Pepsins studiert werden kann. Auf verschiedene Weise (am leichtesten durch Fällung mit Alkohol) kann aus diesen Extrakten das Ferment ausgefällt und nach dem Trocknen in Pulverform erhalten werden (Pepsinpräparate des Handels). Diese gelblich weißen in verdünnter HCl löslichen Pulver sind mit Eiweiß und anderen Stoffen stark verunreinigt. Ferner gelingt es nach Abderhalden (Z. f. phys. Ch. Bd. 71, 1911) aus pepsinhaltigen Lösungen durch Einlegen von Elastin das Pepsin zu adsorbieren. Das pepsinhaltige Elastin gibt das Pepsin an Lösungen wieder ab, so daß auf diese Weise eine Isolierung und Herstellung pepsinhaltiger Lösungen möglich ist. Reines Pepsin ist bisher noch nicht darstellbar gewesen, seine chemische Konstitution ist also unbekannt.

Die Wirkung des Pepsins ist an die Wirkung freier Säure gebunden. Pepsin und Salzsäure des Magensaftes spalten das Eiweiß unter Anlagerung von H_2O an ganz bestimmte Bindungen in seinem Molekül. Es zerfällt dabei in Bruchstücke verschiedener aber immer noch erheblicher Molekulargröße, die Peptone. Die einfachsten Bausteine des Eiweiß, die Aminosäuren, entstehen dabei selbst bei sehr langer Verdauung nicht.

Der Abbau erfolgt allmählich, indem als erste Produkte Syntonin (Acidalbumin schon durch HCl-Wirkung allein entstehend), Albumosen (aussalzbare Peptone) und abiurete Substanzen (abiurete Peptone) entstehen. Bei weiterer Einwirkung treten in kürzester Zeit weitere Peptone auf, die nicht mehr durch Neutralsalze aussalzbar sind (nicht aussalzbare Peptone, Peptone im älteren Sinne) und diese reichern sich bei langer Einwirkung immer mehr an, so daß sie als die eigentlichen Endprodukte der Pepsinwirkung angesehen werden müssen.

Früher nahm man an, daß aus dem Eiweiß über Syntonin primäre Albumosen, sekundäre Albumosen, endlich Peptone entstünden und lehrte, daß von diesen Abbauprodukten bezüglich Molekulargröße und Verwandtschaft die primären Albumosen dem Eiweiß am nächsten, die Peptone am entferntesten stünden. Abderhalden hat das Irrige der Anschauung dadurch erwiesen, daß er Albumosen charakterisierte, die zweifellos geringere Molekulargröße wie gewisse Peptone besaßen. Er hat infolgedessen vorgeschlagen, den Begriff Albumose ganz fallen zu lassen und dieselben in die Gruppe der Peptone einzureihen.

Bedingungen und Abhängigkeit der Pepsinwirkung. 1. Gesetzmäßigkeiten. Die Wirkung des Pepsins unterliegt gewissen Gesetzmäßigkeiten, bei denen Pepsinmenge, Menge des zu verdauenden Substrates, Dauer der Einwirkung und Auftreten von Verdauungsprodukten eine Rolle spielen. Grützner (Pflügers Arch. Bd. 141, 1911) hat vor kurzem die Grundprinzipien dieser Beziehungen wie der Fermentgesetze überhaupt aufgedeckt. Zwar besteht auch für Pepsin die Regel, daß — Beseitigung aller Störungen, also ideale Verhältnisse vorausgesetzt — die in der Zeiteinheit gelösten Eiweißmengen den wirksamen Fermentmengen direkt proportional sind. Tatsächlich sind solche Bedingungen nahezu nur bei sehr großen Verdünnungen erfüllt, andernfalls treten stets Störungen ein, die in ihrer Größe variabel die Wirkungsweise dauernd verändern. Sie bestehen in der Hauptsache darin, daß die gebildeten Verdauungsprodukte hemmend einwirken, was Herabsetzung der Verdauungsgeschwindigkeit zur

Folge hat. Die Hemmungen sind um so größer, je größer die zu verdauenden Eiweißmengen, die wirksamen Pepsinmengen und die Dauer des ganzen Prozesses sind.

Zum Studium solcher Verhältnisse sind Methoden zur Bestimmung relativer Pepsinmengen ausgearbeitet worden. Davon seien einige wichtige Methoden in ihren Grundzügen geschildert:

1. Methode von Grützner. Fein zerschnittenes Fibrin wird mit Karmin gefärbt, ausgewaschen und in 0,1% HCl zum Quellen gebracht. Hiervon werden ca. 1 g betragende Mengen in gleichgroße und weite Reagenzgläser gegeben, mit 0,1% HCl übergossen und steigende Mengen der zu untersuchenden pepsinhaltigen Lösung zugegeben. Bei der Verdauung färbt sich die Flüssigkeit durch Karmin mehr oder weniger rot. Durch Vergleich mit einer Farbskala wird von Zeit zu Zeit die Intensität der Färbung ermittelt und dadurch der relative Pepsingehalt festgestellt.

2. Methode von Mett (bis vor kurzem sehr häufig besonders von Pawlow und seiner Schule verwendet, muß jetzt durch die Feststellungen von Grützner, Abderhalden u. a. als überwunden gelten). Mit koaguliertem Tiereiweiß gefüllte Röhrchen werden in die zu prüfende Lösung eingelegt und die nach bestimmter Zeit eingetretene Verminderung der Eiweißsäule gemessen.

3. Methode von Jacoby und Solms. Durch Ricin getrübte Lösungen werden durch Pepsin und Salzsäure rasch aufgehellt. Man ermittelt unter verschiedenen Gläschen, die gleiche Mengen Ricinlösungen aber steigende Mengen Magensaft enthalten, dasjenige, welches nach 3 Stunden keine Trübung mehr zeigt und berechnet hieraus den relativen Pepsingehalt.

Abhängigkeit der Pepsinwirkung von Menge und Art der Säure. Pepsin ist in neutraler oder alkalischer Lösung unwirksam, es muß freie Säure zugegen sein. Am meisten befördert die Pepsinwirkung HCl, auch HNO_3, H_3PO_4, H_2SO_4 sowie organische Säuren, Oxalsäure, Milchsäure, Essigsäure, können die Pepsinwirkung ermöglichen, sind aber nicht annähernd so wirksam wie HCl. Sehr wichtig ist die Konzentration der Säure, am günstigsten wirkt diejenige, bei der das Eiweiß am leichtesten und raschesten aufquillt. Diese ist bei HCl 0,1 bis 0,2%; höhere Konzentrationen 0,6% hemmen ebenso wie sehr geringe 0,02 bis 0,04%. Organische Säuren, wie sie im Magen der Herbivoren stets zugegen sind, bedürfen einer viel höheren Konzentration um Pepsinwirkung zu erzielen. Milchsäure ca. 1,5 bis 2,5%.

Beeinflussung der Pepsinwirkung durch die Art des Eiweißes. Die Eiweißkörper verhalten sich gegen Pepsin und HCl keinesfalls gleichartig. Animalische Eiweißkörper sind im allgemeinen leichter verdaulich als pflanzliche, unkoagulierte leichter als koagulierte. Weitgehende Unterschiede bestehen zwischen den animalen Proteinsubstanzen.

Von den Albuminoidsubstanzen ist Keratin (Wolle, Haare, Hornsubstanzen, das Stratum corneum des mehrschichtigen Plattenepithels) unverdaulich, Elastin wird verdaut, Kollagen, Leim werden leicht und rasch peptonisiert, infolgedessen sind Sehnen, Häute, Sarcolemm, überhaupt leimgebendes Bindegewebe leicht verdaulich. Auch von Knorpeln und Knochen wird hauptsächlich das organische leimgebende Grundgewebe verdaut. Von den Proteiden zerfällt Hämoglobin in Hämatin und Globin, welches peptonisiert wird. Nukleoproteide werden in einen verdaulichen Eiweißrest und in durch Pepsin und HCl unverdauliches Nuklein, welches neben einem Eiweißrest noch die Nukleinsäure enthält, gespalten. Daher werden die Zellkerne im Magen nicht gelöst. Auch Mucin (Schleim) ist verdaulich. Von den Nukleoalbuminen hinterlassen die Kaseine der Wiederkäuer einen in Pepsinsalzsäure unverdaulichen phosphorhaltigen Rückstand, Pseudonuklein, während andere Kaseine (Frau, Pferd, Esel) völlig gelöst werden.

Abhängigkeit der Pepsinwirkung von der Gegenwart verschiedener chemischer Substanzen. Zahlreiche Substanzen hindern die Pepsinwirkung z. B. Antiseptika wie Phenol, Salizylsäure, Formaldehyd in Konzentration von mehr als 5%, Benzoesäure, ferner Salzlösungen wie Schwermetallsalze, Eisenverbindungen, Alkali- und Erdalkalisalze besonders in höherer Konzentration und anorganische Kolloide. Alkohol stört bis zu 10% die Pepsinwirkung nicht. Hingegen wirken Bier und Wein viel stärker hemmend als ihrem Alkoholgehalt entspricht. Kaffee und Tee hemmen ebenfalls, während Koffein und Theobromin ebenso wie Chinin eher fördernd wirken. Fördernd wirken auch Gewürze.

β) Das Chymosin (Labferment) und seine Wirkung. Wird Kuhmilch mit Magensaft oder einem Extrakt aus Magenschleimhaut versetzt, so unterliegt sie einem eigenartigen Gerinnungsvorgang, der Labgerinnung. Die Milch wird zunächst gallertartig, bei längerem Stehen zieht sie sich zu einem festen Kuchen zusammen und preßt dabei eine schwach gelbliche Flüssigkeit aus (süße Molke). Dieser Vorgang ist schon im Altertum bekannt gewesen und wurde damals wie auch jetzt noch bei der Käsebereitung verwendet. Als Wirkung eines Enzyms wurde er von Hammarsten erkannt, der das aus Kälbermagenschleimhaut entstammende Enzym Chymosin nannte. Im Magensaft des Menschen und Schweines fand Bang ein von ihm Parachymosin genanntes Labferment vor, welches sich vom Chymosin durch seine geringe Widerstandsfähigkeit gegen Alkali und seine Resistenz gegen höhere Temperaturen geringgradig unterscheidet. Charakterisiert ist das Labferment dadurch, daß es bei neutraler und sogar sehr schwach alkalischer Reaktion wirkt. Es ist demnach die Labgerinnung von der Säuregerinnung der Milch scharf zu unterscheiden. Diese erfolgt unter Abscheidung von Kasein, während der bei der Labgerinnung ausfallende Körper sich chemisch scharf vom Kasein unterscheidet, er wird Parakasein genannt.

Gewinnung und Eigenschaften. In allen Extrakten der Magenschleimhaut findet

sich neben Pepsin auch Labferment. Auch das Labferment läßt sich in Pulverform (vgl. bei Pepsin) darstellen und ist in dieser Form oder als Extrakt im Handel. Chemisch rein ist es noch nicht dargestellt worden, seine Konstitution ist unbekannt. Von den Fundus- und Pylorusdrüsen wird es als Zymogen abgesondert. Durch Salzsäure wird dieses in das Enzym übergeführt.

Frage der Identität von Pepsin und Chymosin. Infolge der steten gemeinsamen Anwesenheit von Pepsin und Lab und einem weitgehenden Parallelismus bei deren Wirkungen hat Pawlow eine Identität beider Fermente gefolgert (Z. phys. Ch., Bd. 42, 1901). Es wäre dann die Bildung von Parakasein auf eine synthetische Wirkung zurückzuführen oder nach Sawjalow und anderen nur der erste Schritt zur peptischen Verdauung des Kaseins. Hammarsten hält aber an der Verschiedenheit beider Fermente fest, da er sowohl pepsinarme oder pepsinfreie Lablösungen als auch labfreie Pepsinlösungen darstellen und unter geeigneten Versuchsbedingungen den Parallelismus zwischen Lab- und Pepsinwirkung aufheben konnte (Zeitschr. f. phys. Ch., Bd. 56, 1908; Bd. 74, 1911). Beiden Anschauungen wird die Hypothese von Nencki und Sieber gerecht, nach der beide Fermentwirkungen an verschiedene Seitenketten eines Riesenmoleküls geknüpft sein sollen.

Wirkungsweise des Labferments. Die Gerinnungserscheinung, die Abscheidung des Labkuchens hat mit der Fermentwirkung selbst nichts zu tun, diese beruht darin, daß das Kasein unter Veränderung seiner chemischen Konstitution in einen anderen Körper, das Parakasein, übergeführt wird. Da das Kalksalz des Parakaseins unlöslich ist, fällt dieses in Ca-Salz haltigen Lösungen (wie z. B. der Milch) aus. Das Auftreten des Labgerinnsels ist also ein sekundärer Vorgang. In der Tat gerinnen Ca-freie Kaseinlösungen durch Labferment nicht, sobald aber, (auch nach Zerstörung des Fermentes durch Sieden) Kalksalze zugesetzt werden, tritt die Gerinnung ein. Der Chemismus der Umwandlung von Kasein in Parakasein ist unbekannt, man nimmt an, daß es sich um eine Hydrolyse handelt. Neben Parakasein entsteht dabei in geringer Menge (Hammarsten, Fuld, Spiro, Schmidt-Nilsen) ein albumoseartiger Körper, Molkeneiweiß.

Das Labferment wird durch Erhitzen seiner Lösungen auf 70° zerstört, in trockenem Zustande ist es gegen weit höhere Temperaturen unempfindlich. Die Labwirkung verläuft nach dem Gesetze, daß die Gerinnungszeit der Labmenge umgekehrt proportional ist (Storch-Segelcke, Fuld).

4b) Wirkung des Magensaftes auf Fette. Das fettspaltende Ferment des Magensaftes (Magenlipase) wirkt nur auf sehr fein emulgierte Fette (Volhard Zeitschr. klin. Med. Bd. 42 u. 43, 1901). Mit Glyzerin ist es aus der Magenschleimhaut extrahierbar und wirkt bei schwach saurer Reaktion; als Produkte entstehen Fettsäuren und Glyzerin. Der Umfang seiner Wirkung ist nicht sehr beträchtlich. Im Magen des Schweines, aber nicht in dem des Pferdes und der Wiederkäuer fanden Ellenberger und Hofmeister ein solches Ferment.

4c) Wirkung des Magensaftes auf Kohlehydrate. Eine Spaltung von Kohlehydraten durch Magensaft mit Hilfe von Fermenten findet nicht statt. Eine Ausnahme machen vielleicht gewisse Tiere (z. B. das Schwein), aus deren Magenschleimhaut ein diastatisches Ferment extrahiert werden kann. Eine Spaltung von Stärkekleister und Disacchariden wie Rohrzucker kann aber durch die HCl des Magensaftes, sofern diese in genügend hoher Konzentration zur Wirkung gelangt, stattfinden, hierfür sprechen verschiedene an Hunden erhobene Befunde. Die Verdauung der Stärke usw., die im Magen der Omnivoren und Pflanzenfresser stattfindet, wird hauptsächlich durch die Speicheldiastase und das in den pflanzlichen rohen Nahrungsmitteln enthaltene diastatische Ferment bewirkt (Ellenberger Skand. Arch. Phys., Bd. 18, 1906).

4d) Selbstverdauung des Magens. Die tote oder anämische Magenwand wird rasch durch Magensaft oder Pankreassaft verdaut (Ulcus, postmortale Verdauung), die lebendige nicht. Zur Erklärung sind verschiedene Hypothesen aufgestellt worden, deren wichtigsten die folgenden sind:

1. Die Säure des Magensaftes soll durch das Alkali des Blutes neutralisiert und damit die Selbstverdauung gehindert werden (älteste Anschauung).

2. Der die Innenfläche des Magens und die Grübchen bedeckende Schleim soll die Magenwand vor der Verdauung schützen.

3. In der Magenschleimhaut und in dem Schleim sind Antifermente gefunden worden (Weinland, Blum und Fuld), speziell Antipepsin, ein Körper, der die Wirkung des Pepsins hemmt. Durch ihn soll der Schutz ausgeübt werden.

4. Am wahrscheinlichsten ist die auf den Ergebnissen der modernen Fermentchemie beruhende Hypothese Abderhaldens (Lehrb. der Physiol. Chemie). Jedes Ferment kann bekanntlich nur Körper von ganz bestimmter chemischer Konstitution und sterischer Konfiguration spalten. Das lebende Protoplasma der Magenschleimhaut besitzt nun einen solchen Bau, daß es vom Pepsin oder Trypsin nicht angegriffen werden kann. In der toten Schleimhaut ist es denaturiert, hat seine spezifische Struktur verloren und kann nunmehr verdaut werden.

5. Gut in Einklang läßt sich hiermit eine ältere Hypothese bringen, nach der das lebendige durch die Blutzirkulation normal ernährte Zellprotoplasma sich gegenüber den Verdauungssäften anders als das nicht ernährte tote verhalten soll (Fermi u. Otte).

5. Mechanik des Magens. 5a) Geschichtliches. Die Autoren des 17. und 18. Jahrhunderts legten den Bewegungen und der damit verbundenen Tätigkeit des Magens

eine große Bedeutung bei und haben zahlreiche und vielfach richtige Beobachtungen über diese in ihren Schriften niedergelegt. Sie glaubten zum Teil, daß die Verarbeitung der Nahrung auf mechanischem Wege erfolge, wie schon Erasistratus im Altertum gelehrt hatte. Die erstaunlichen Befunde von Réaumur und Spallanzani über die enormen Wirkungen, die der Muskelmagen der Vögel zu äußern imstande ist, stützten diese Anschauungen. Nachdem durch Tiedemann und Gmelin, Bidder und Schmidt, Eberle, Schwann u. a. die Bedeutung der chemischen Vorgänge bei der Magenverdauung immer klarer erkannt worden war, verfiel man in die gegenteilige Anschauung und vernachlässigte das Studium der Mechanik, weil man die mechanischen Vorgänge für unwesentlich hielt. Die Forschung betätigte sich deshalb fast ausschließlich in chemischer Richtung. So kam es, daß im Laufe des 19. Jahrhunderts wichtige Erfahrungen der Alten in Vergessenheit gerieten und erst neu entdeckt werden mußten. Da die Forschungsmethoden bis in die allerletzte Zeit in den Kinderschuhen steckten, hat man lange kein klares und einheitliches Bild über diese Vorgänge, deren große Bedeutung für den Transport des Mageninhaltes und den Ablauf der Verdauungsvorgänge man immer deutlicher erkannte, gewinnen können.

Dies ist erst in den letzten Jahren, vor allem mit Hilfe der Röntgenuntersuchungen (an Tieren besonders Cannon, Magnus, an Menschen Rieder, Roux und Balthazard, Kaufmann, Holzknecht u. a.) und besonders durch kinematographische Röntgenaufnahmen, Bioröntgenographie (Kästle, Rieder und Rosenthal, Z. f. Röntgenkunde, Bd. XII, 1910) gewonnen worden.

5b) Die Bewegungen des Magens. Die Bewegungen, die der Magen ausführt, sind je nach der Gestaltung desselben (vgl. S. 539) sehr verschieden und lassen sich deshalb nicht überblicken, solange nicht Forschungen bei dem Magen jeder Tierart vorliegen. Bisher ist man am genauesten über die Bewegungen der einfachen Mägen der Fleischfresser und vor allem des Menschen unterrichtet. Die Mechanik dieser Mägen ähnelt einander sehr, sie dürfte auch bei allen einhöhligen Mägen anderer Tiere ziemlich dieselbe sein.

Im Hungerzustand ruht der Magen oder entwickelt automatisch eine minimale rhythmische motorische Tätigkeit (Mangold). Die beiden Oeffnungen, Cardia und Pylorus, des Magens sind für gewöhnlich fest geschlossen. Sie öffnen sich nur auf besondere Reize, die Cardia beim Eintritt der Nahrung oder dem Brechakt, der Pylorus beim Austritt von Mageninhalt oder Rücktritt von Darminhalt in den Magen. Der Magen umschließt infolge seiner Elastizität seinen Inhalt mit Einschluß von Gasmengen fest. Er ist, wie die alten Autoren treffend sagten „auf sich selbst zurückgezogen". Bei der Tätigkeit befindet sich der linke, cardiaseitige, fundale Teil des Magens dauernd in einem Zustand tonischer Kontraktion, wodurch ein Druck von 6 bis etwa 10 cm Wasser ausgeübt wird. An ihm beobachtet man nur sanfte von der Cardia distal fortschreitende Wellen. Der rechtsseitige, pylorusseitige Teil hingegen zeigt energische, rhythmische, fortschreitende Wellenbewegungen, er ist der eigentliche motorische Teil des Magens. Beim Hunde bestand daselbst in einem Fall ein Druck von 8 bis 10 mm Quecksilber und die Antrumkontraktionen bewirkten eine durchschnittliche aktive Drucksteigerung von 34,6 mm Hg (Mangold, D. med. Woch. 1911). Beim Menschen fand man Schwankungen von 25 bis 60 cm Wasser.

Das Zusammenarbeiten beider Teile stellt sich nach dem kinematographischen Röntgenbild wie folgt dar (Fig. 28). Von der Cardia herkommend laufen oberflächliche, sanfte, kaum sichtbare Wellen langsam und periodisch

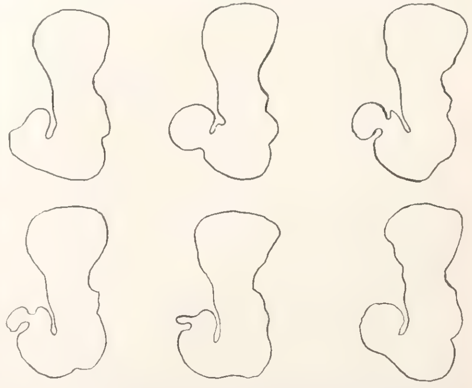


Fig. 28. Phasen der Bewegung des menschlichen Magens. Nach einem Bioröntgenogramm von Kästle, Rieder und Rosenthal.

pyloruswärts ab. Sobald diese zum Beginn des Antrum pylori gelangen, zu der Stelle, an der der Magen scharf nach der anderen Körperseite umbiegt, werden sie tief und laufen dann in Gestalt tiefer Einschnürungen als kräftige peristaltische Wellen zum Pylorus. Ehe noch der Pylorus erreicht ist, nimmt schon eine andere Welle an der Cardia ihren Anfang. Die Bewegungen von Magenkörper und Antrum pylori stellen also einen einheitlichen Vorgang dar.

Die Wellen folgen einander ganz regelmäßig, längere Pausen treten normalerweise nur ganz selten ein. Die Dauer des Ablaufes einer Wellenbewegung vom Ursprung bis

zum Pylorus beträgt beim gesunden Menschen nach übereinstimmenden zahlreichen Beobachtungen etwa 21 Sek. (Holzknecht, Rieder, Kaufmann und Kienböck, Dietlen, Verhdlg. d. deutsch. Röntgenges., Bd. VII 1911). Zu Beginn und gegen Ende der Verdauung ist die Zahl etwas größer, so daß Schwankungen von 20 bis 28 Sek. unter physiologischen Verhältnissen beobachtet werden. Jede am Pylorus ankommende Welle dürfte ferner in der Regel von einer Oeffnung des Sphincter pylori und damit Entleerung von Magenchymus begleitet sein; doch sind einige Autoren auch gegenteiliger Meinung. Beim Hunde ist ein völliger Synchronismus von Antrumperistaltik und Sphinkteröffnung als Regel anzunehmen (Kirschner und Mangold Mttlg. a. d. Grenzgeb. d. Med. u. Chir., Bd. 23, 1911).

Die Tiefe der Wellen ist sehr verschieden, manchmal scheint eine tiefe beinahe vollständige Abschnürung des Antrum pylori zu bestehen, eine Beobachtung, die zu der Annahme eines übrigens anatomisch nicht vorhandenen Sphincter antri pylori geführt hat. Es liegen Beobachtungen vor, daß der Magen auch längere Zeit in einem solchen Kontraktionszustand verharren kann[1]). Nach Morphiumgaben ist dies festgestellt (Dietlen). Bei der nach neueren Untersuchungen anzunehmenden großen Abhängigkeit der Peristaltik von chemischen Reizen, die der Mageninhalt auf die Magenschleimhaut oder nach dem Erguß ins Duodenum von dort ausübt, ist dies nicht ausgeschlossen, zur Lösung dieser Frage bedarf es weiterer Untersuchungen. Wahrscheinlich wird aber eine am Eingange ins Antrum befindliche Abschnürung meist als eine Phase des oben geschilderten Bewegungsablaufes aufzufassen sein.

5 c) Beeinflussung der Magenbewegungen durch verschiedene Reize. Die Bewegungen der Magenmuskulatur werden hervorgerufen und beeinflußt durch Reize, die auf die Magenschleimhaut vom Inhalt ausgeübt werden. Der mechanische Reiz, der bei der Berührung mit Inhalt auf die Magenwand ausgeübt wird, genügt die Bewegung auszulösen. Auch psychische Reize sind wirksam, z. B. wirken psychische Erregungen (Schmerz, Angst, Wut) u. dgl. hemmend ein (vgl. S. 522). Wie auch röntgenographische Untersuchungen am Menschen neuerdings dargetan haben, sind chemische Reize von wesentlicher Bedeutung.

Nach Dietlen (Vhdlg. d. deutsch. Röntgenges, Bd. VII, 1911) veranlaßt Füllung des Magens mit Wismutöl, also Fett, eine auffallende Verminderung der Peristaltik. Der Magen verhält sich dann ganz ruhig oder zeigt nur ganz geringe Bewegungen, so daß seine Entleerung wesentlich verzögert wird. Diese Beobachtung stimmt trefflich mit der schon seit langem bekannten Tatsache überein, daß Fettnahrung den Magen am langsamsten verläßt (Belästigung des Menschen durch sehr fette Nahrung). Auch Salzsäure als Beigabe zur Wismutmahlzeit verzögert nach dem genannten Autor die Entleerung.

Vom Darm aus werden die Antrumkontraktionen und damit wohl auch die Peristaltik des Magens überhaupt reflektorisch beeinflußt. Kirschner und Mangold fanden bei Hunden, deren Antrumperistaltik graphisch registriert wurde, daß Einspritzungen von Oel und Salzsäure die Stärke der Antrumkontraktionen herabsetzten, ihren Rhythmus hingegen unbeeinflußt ließen. Auf die außerordentliche Bedeutung dieser Beziehungen für die Entleerung des Magens, die weiter unten besprochen wird, sei an dieser Stelle nur hingewiesen.

5d) Mechanik bei der Getränkaufnahme. Ein besonderer Mechanismus tritt vielleicht noch bei der Getränkaufnahme in Tätigkeit. Cohnheim (Münch. med. Woch. 1907) beobachtete am Hunde mit einer kurz hinter dem Pylorus gelegenen Duodenalfistel, daß auch bei gefülltem Magen das aufgenommene Tränkwasser ziemlich rasch aus dem Magen schubweise entleert wird und daß dieses Wasser oft so gut wie keine Beimengungen von Mageninhalt enthielt. Auch von älteren Autoren ist das rasche Passieren von Flüssigkeiten durch den Magen gelehrt worden. Dieses Phänomen ist auf das Vorhandensein und die Tätigkeit der Schrägmuskulatur des Magens, besonders der sogenannten Cardiamuskelschleife zurückgeführt worden. Die Schenkel dieser Muskelschleife ziehen an der kleinen Kurvatur pylorusswärts und strahlen an der Funduspylorusdrüsengrenze in die Kreismuskelschicht aus, Ellenberger und Seber (wichtig für die Antralfurchenbildung). Bei Kontraktion dieser Schleife könnte zwischen ihren beiden verdickten Schenkeln eine Rinne (Retzius, Hasse, Strecker, Kaufmann) entstehen. Dabei wird der Pylorus an die Cardia herangezogen, so daß Flüssigkeiten und weiche dünnbreiige Massen, ohne sich mit dem Inhalt zu mischen, in das Antrum pylori oder direkt an den Pylorus gelangen können. Dieser Anschauung, die auch Ellenberger und ich vertreten haben, kann ich in ihrem vollen Umfange nicht mehr zustimmen. Versuche an Pferden,

[1]) Bis zum Bekanntwerden der bioröntgenographischen Aufnahmen nahmen zahlreiche Autoren die Unabhängigkeit der Pars pylorica vom übrigen Magen in motorischer Hinsicht an. Zwischen beiden sollte während der Verdauung eine Einschnürung (die Antralfurche) bestehen, an der die Wellenbewegungen der Pylorusregion beginnen sollten. Ein Fortschreiten der Wellen der cardiaseitigen Abteilung auf das Antrum wurde vielfach geleugnet, obwohl Cannon auf Grund seiner Röntgenuntersuchungen schon 1897 ausdrücklich darauf hingewiesen hatte.

die von allen Tieren die am stärksten ausgeprägte Cardiamuskelschleife haben und an Hunden zeigten, daß nach dem Trinken von gefärbtem Wasser die ganze Oberfläche des Mageninhaltes gefärbt war. Das Wasser

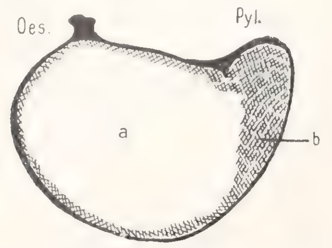


Fig. 29. Gefrierquerschnitt durch den Magen eines Hundes, der nach einer Mahlzeit (Fleisch und Kartoffeln) 60 ccm rotgefärbtes Wasser getrunken hatte und 5 Min. danach getötet worden war. a Ungefärbter Inhalt, b rotgefärbter Inhalt.

hatte also seinen Weg keineswegs ausschließlich entlang der kleinen Kurvatur genommen (Fig. 29). Die Existenz der geschilderten Rinne, die Kaufmann (Z. f. Heilkunde, Bd. 28, 1907) an im Kontraktionszustande nach Physostigminvergiftung gehärteten Hundemägen einwandfrei dargestellt hat, soll damit nicht bestritten werden (vgl. S. 554).

5e) Anfüllung des Magens und Bewegungen des Mageninhaltes. Bei der Anfüllung dehnt sich der Magen, dessen Wände cardiaseitig besonders reich an elastischem Gewebe (Ellenberger) sind, nach Maßgabe der Füllung aus, wobei sich die beim leeren Magen im Falten liegende Schleimhaut glättet und die geschlängelt liegenden Nerven und Gefäße strecken. Im gefüllten Zustande berührt dann der Magen die Bauchwand (nicht bei Einhufern) und verschiebt die umliegenden Organe beckenwärts. Bei der Entleerung zieht sich die Magenwand vermöge ihrer Elastizität ohne Muskelkontraktion zusammen.

Man hat lange Zeit angenommen, daß im Magen eine Durchmischung der Speisen schon bei der Anfüllung, sicher aber während der Verdauung zustande käme, ja man glaubte, daß die Magenbewegungen den Zweck hätten, eine solche Durchmischung zu bewirken.

Dies ist aber keineswegs der Fall, vielmehr haben Ellenberger und seine Mitarbeiter Hofmeister und Goldschmidt gezeigt, daß der Mageninhalt stets in charakteristischer Weise geschichtet ist und daß weitgehende chemische Unterschiede zwischen seinen einzelnen Teilen bestehen (Ellenberger, Hdb. d. vgl. Physiologie d. Haustiere, Bd. I, 1890 und Pflüg. Arch., Bd. 114, 1906). Dies geschah durch chemische Untersuchungen des Inhaltes in einzelne Portionen abgeschnürter Mägen von Pferd, Schwein und Hund und durch Betrachtung durchschnittener Mägen von Pferden, die abwechselnd Heu und Hafer genossen hatten. In neuerer Zeit hat Grützner (Pflüg. Arch., Bd. 106, 1905) Mägen von mit verschiedenfarbigem Futter gefütterten Tieren gefroren und durchsägt und dadurch eine noch genauere Erforschung dieser Verhältnisse ermöglicht. Neuerdings ist auch auf röntgenoskopischem Wege die Schichtung der Nahrung im Menschenmagen (abwechselnd wismuthaltiger und wismutfreier Brei) bestätigt worden, Cannon 1898, Kaufmann und Kienböck (Verhdlg. d. deutsch. Röntgenges., Bd. VII, 1911 und Med. Klinik 1911).

Die Anfüllungsverhältnisse dürften sich im allgemeinen wie folgt gestalten. Die eintretenden Bissen schieben die vorher aufgenommenen Bissen vor sich her dorthin, wo sich der geringste Widerstand bietet. Die dabei zustandekommende Bewegung ist abhängig von der Konsistenz der in den Magen tretenden Massen, der Lage des Magens in der Bauchhöhle und der Einmündungsrichtung der Speiseröhre in den Magen. Daher bestehen zwischen dem Menschen und den einzelnen Tierarten mit einhöhligen Magen ohne Zweifel kleine Unterschiede (vgl. Fig. 30 bis 34). Nahrungsmittel gleicher Konsistenz schichten sich direkt übereinander, wobei die einzelnen Schichten an der großen Kurvatur am mächtigsten sind und zum Pylorus zu an Dicke abnehmen.

Sind die in den Magen eintretenden Massen von festerer Konsistenz als der Mageninhalt, so werden sie in denselben hineingepreßt und ihn verdrängen, so daß eine mehr konzentrische Schichtung zustandekommt. Umgekehrt können sich dünnere Massen bei ihrem Eintritt in einen teilweise mit festen Massen gefüllten Magen um die festen Teile herum schichten.

Man trifft somit im Magen den Inhalt stets wohlgeordnet an. Während der Verdauung bleibt diese Schichtung im cardiaseitigen Magenteil erhalten, solange nicht der Inhalt allzuweit verdaut, größtenteils entleert und wasserreich geworden ist, was aber erst in ganz späten Verdauungsstunden der Fall ist. Die leichten, über den Inhalt hinstreichenden Bewegungen der Magenwand vermögen hier nicht die Schichtung zu zerstören, sie tragen höchstens die oberflächlich verdauten Schichten ab und transportieren sie zum Antrum pylori. Außerdem genügt die tonische Kontraktion, um den Inhalt dorthin vorzuschieben. Im Antrum pylori selbst hingegen findet eine Durchmischung statt, hervorgerufen durch die dort tiefen und energischen peristaltischen Wellen, die den wasserreichen Inhalt durchkneten, und ein Hinundherströmen desselben veranlassen (vgl. Fig. 34).

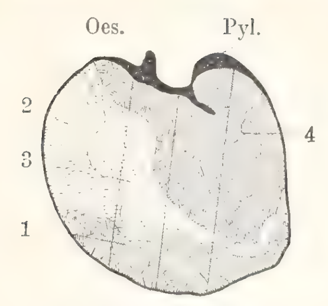


Fig. 30. Längsschnitt durch den gefrorenen Magen eines Pferdes, welches 1. Heu; 2. ungefärbten Hafer; 3. blaugefärbten Hafer; 4. Heu gefressen hatte und sofort nach Beendigung der Mahlzeit getötet worden war. Die 3 parallelen Geraden zeigen die Lage der Querschnitte an.

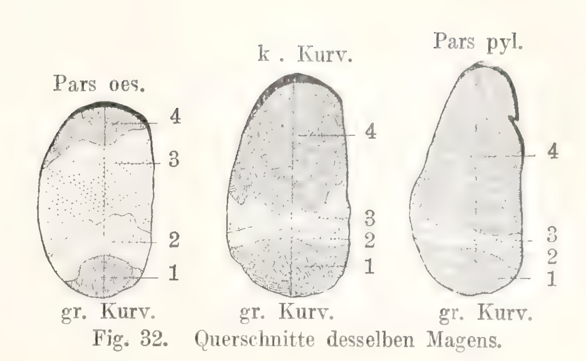
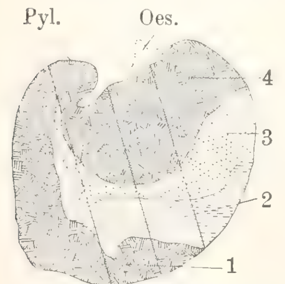


Fig. 32. Querschnitte desselben Magens.



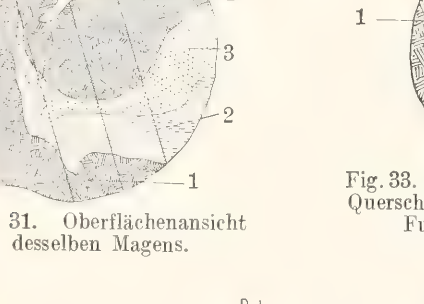


Fig. 31. Oberflächenansicht desselben Magens.

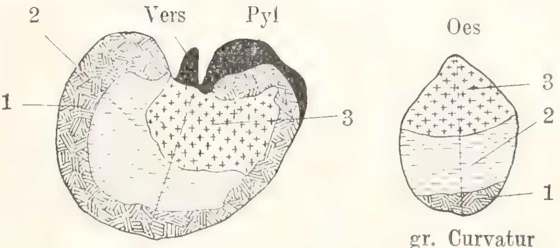


Fig. 33. Gefrierschnitte durch einen Kaninchenmagen und Querschnitt dazu. 1 dunkelgrünes, 2 hellgrünes, 3 rotes Futter. Tötung 40 Min. nach der Mahlzeit.

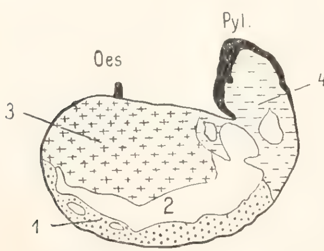


Fig. 34. Gefrierschnitt durch den Magen eines Hundes der 1 blaues, 2 weißes, 3 rotes Futter erhalten hatte und 3 Stunden nach Beendigung der Mahlzeit getötet worden war.

5f) Entleerung des Magens. Die Entleerung des Magens beginnt bei leicht verdaulicher Nahrung schon wenige Minuten nach der Nahrungsaufnahme (bei Fleisch nach 10 bis 12 Min.), bei schwer verdaulicher später (½ bis 1 Stunde). Sie erfolgt in Form von Güssen, die sich ziemlich regelmäßig folgen. Beim mit Fleisch gefütterten Hunde betragen diese bis zu 1 ccm und bestehen aus einer sauer reagierenden, feste Partikelchen kaum enthaltenden Flüssigkeit. Die Dauer der Entleerung ist sehr verschieden und hängt von der Menge und Art sowie Zusammensetzung der Nahrung ab.

Leicht verdauliche Nahrungsmittel verlassen den Magen am schnellsten, eiweißreiche Nahrungsmittel (besonders also Fleisch) verbleiben länger im Magen, am längsten das schwer zu verflüssigende und im Magen nur langsam verdauliche Fett. Die Entleerung der einzelnen Nährstoffe hängt so im großen und ganzen davon ab, wie rasch sie vom Magensaft gelöst, bezw. verdaut werden. Das Gelöste kann leicht weiter befördert werden und vom Antrum pylori aus durch Säure- und Wassergehalt den Oeffnungsreiz auf den Pylorus ausüben. So kommt es, daß die Nahrungsbestandteile, die am schnellsten gelöst werden, auch am raschesten den Magen verlassen, fein verteiltes Fleisch also z. B. schneller entleert wird als solches, das in großen Stücken genossen wird oder mit Fett durchtränkt ist, daß Zucker und durch die Speicheldiastase rasch verdaute Stärke den Magen schneller verlassen wie unverdauliche Zellulose. Dazu kommt noch die Einwirkung, die der Inhalt auf die Magensaftabsonderung und Peristaltik ausübt. Fett setzt, wie oben erwähnt, die Sekretion und Peristaltik herab, hindert also dadurch den ganzen Prozeß und somit auch die Verflüssigung und Entleerung (Näheres s. im Artikel „Verdauung").

Der Uebertritt des Mageninhaltes in den

Darm wird reguliert durch Reflexe (Pylorusreflexe), die meist Chemoreflexe, selten Mechanoreflexe sind und die sowohl von der Magen- als von der Darmschleimhaut aus wirken (Hirsch, v. Mering und Moritz). Durch diese Reflexe wird der Tonus des Sphincter pylori erhöht oder vermindert, was Schluß oder Oeffnung des Pylorus zur Folge hat. Nach an Hunden gewonnenen Beobachtungen bewirken vom Duodenum aus Salzsäure und Fett Schluß, Füllung mit Wasser, ferner Alkalien und Salzlösungen Oeffnung des Pylorus. Ebenso wirkt Leere und Anämie öffnend, während starke Füllung des Duodenums Schluß veranlaßt. Vom Magen aus wirken starker Säuregehalt im Antrum pylori und Füllung mit Wasser als Oeffnungsreiz, während mechanische Berührung der Pylorusschleimhaut Schluß veranlassen soll. Es sei daran erinnert, daß nach Kirschner und Mangold durch die chemoreflektorischen Hemmungen durch Oel und Salzsäure nicht allein der Tonus des Sphinkters erhöht, sondern auch die Antrumperistaltik in ihrer Stärke vermindert wird.

Der Mechanismus der Entleerung ist dann so zu denken (Cannon), daß durch Ansteigen der Salzsäurekonzentration über einen gewissen Punkt eine Oeffnung ausgelöst wird, der sofort eine Schließung, bewirkt durch die Berührung der Duodenalschleimhaut mit dem sauren Guß, folgt. Dieser wird nun infolge der lebhaft reflektorisch einsetzenden Sekretion sich ins Darmlumen ergießender alkalischer Verdauungssäfte (Pankreassaft, Galle und Darmsaft) neutralisiert. Dadurch wird die Hemmung beseitigt, so daß der Säurereiz vom Magen wieder eine Oeffnung bewirken kann. Als wichtig für den raschen Durchtritt der Getränke sei nochmals hervorgehoben, daß Füllung mit Wasser sowohl vom Magen als auch vom Duodenum aus öffnend auf den Sphinkter wirkt.

5g) Die Innervation der Magenbewegungen. N. vagus und N. sympathicus führen die sensiblen und motorischen Nervenfasern des Magens und zwar ist der N. vagus der wesentlichste motorische Nerv für den Magen und seine Sphinkteren. Dem N. sympathicus werden vorwiegend hemmende Wirkungen zugeschrieben, solche sind auch von den Vagi bekannt geworden, da aber in den Vagusbahnen auch sympathische Fasern verlaufen, ist es schwer zu entscheiden, ob dies nur scheinbar ist. Motorische Zentren für den Magen sind in den Corpora quadrigemina und im Hals- und Brustmark zu suchen.

Ein Einfluß des Großhirns auf die Magenbewegungen und die Entleerung besteht ebenfalls (Pawlow, Cannon, Am. Journ. Phys., 1, 1898). Angst und Zorn hemmen die Bewegungen des Magens und lassen seine Entleerung aufhören; sobald Beruhigung eintritt, beginnt die Entleerung von neuem. Es besteht hier also weitgehende Analogie mit den bei der Sekretion des Magensaftes wichtigen Reflexen.

Trennt man den Magen von den von außen kommenden nervösen Bahnen, so ist seine motorische Funktion zeitweilig unterbrochen. Allmählich scheint sie aber wieder beinahe vollständig zurückzukehren (vgl. z. B. Ducchesi, Arch. Fisiol., Bd. VIII, 1911; bei Kaninchen Auer, Am. Journ. Phys., 25, 1910). Nach neueren Beobachtungen Cannons (Am. Journ. Phys., Bd. 27, 1911) wird die Peristaltik durch einen Vagusimpuls eingeleitet, dann aber autonom vom Magen fortgesetzt; denn Vagusdurchschneidung nach Beginn der Verdauung hat Sistieren der Peristaltik nicht zur Folge. Die nach Vagusdurchschneidung beobachtete Restitution ist auf die Anwesenheit automatischer Zentren zurückzuführen, von denen der Auerbachsche Plexus im ganzen Magen zwischen den Muskelschichten liegt und die am Pylorus und der Cardia liegenden Ganglien (v. Openchowski) zu nennen sind. Offenbar besitzt jeder der 4 oder 5 Teile des Magens (Cardia, cardiaseitiger Magenteil (Vormagen), Antrum, Pylorus) seine eigenen Zentren, so daß sie sich unabhängig voneinander kontrahieren können. In überzeugender Weise haben neuerdings Kirschner und Mangold (Mttlg. a. d. Grenzgeb. d. Med. u. Chir., Bd. 23, 1911) die Unabhängigkeit des Pylorusteil des Magens und des Sphinkters von der Versorgung durch die Nn. vagi und vom Zusammenhang mit dem übrigen Magen dargetan. Bei Hunden stellten sie nach Querdurchtrennung des Magens fest, daß die Antrumperistaltik, die Funktionen des Sphinkters, sowie das koordinierte Zusammenarbeiten ebenso wie die Pylorusreflexe ungestört erhalten waren.

5h) Das Erbrechen. Der Brechakt ist unwillkürlich und erfolgt reflektorisch. Er dient entweder physiologisch zur Abwehr von Krankheitsursachen oder tritt auch pathologisch bei Erkrankungen ein. Er ist mit Ekelgefühlen verbunden.

Die zum Hinauftreiben des Mageninhaltes durch die Speiseröhre in den Mund nötige Kraft wird in erster Linie von der Bauchpresse hervorgebracht. Daher wird der Brechakt mit einer tiefen Inspiration eingeleitet und das Individuum muß im Inspirationszustande verharren. Außerdem muß, um das Erbrechen zu ermöglichen, die Cardia aktiv geöffnet werden (Magendie), dies geschieht reflektorisch und wird z. B. vom Magen her durch einen Druck von 25 mm H_2O darin, ferner durch Reizung bestimmter Bezirke der Schlundkopfwand, ausgelöst. Als unterstützendes Moment treten beim

Erbrechen eine Erweiterung und Erschlaffung des cardiaseitigen Magenteils und kräftige Bewegungen des Antrum pylori auf, die den Inhalt dorthin und durch den Oesophagus treiben. Antiperistaltische Bewegungen des Oesophagus, die das Hinausschleudern des Inhaltes unterstützen, scheinen hingegen zu fehlen. Verschluß des Nasenrachens durch Spannen und Heben des Gaumensegels und Schluß des Kehlkopfes sowie Oeffnung des Mundes treten reflektorisch ein.

Mensch und Fleischfresser, deren Speiseröhre dünnwandig ist und trichterförmig in den Magen mündet und deren Nahrung breiig und schlüpfrig ist, erbrechen leicht. Tiere, deren distales Speiseröhrenende verdickt, schief in den Magen eingepflanzt ist und die eine rauhe trockene Nahrung genießen, erbrechen schwer. So können Einhufer (Pferde) normaliter nicht erbrechen. Bei den Wiederkäuern kann von einem eigentlichen Erbrechen nicht gesprochen werden, da der Inhalt ihres Verdauungsmagens, des 4. Magens, unmöglich durch die vorgelagerten 3 Mägen gelangen kann. Sie erbrechen deshalb, was nur sehr selten und schwer geschieht, den Inhalt der beiden l. Vormägen. Ein in seiner Mechanik dem Erbrechen ähnlicher Akt ist der Ruktus, das Rülpsen, das bei den Wiederkäuern ein zur Entfernung der bei den Gärungsvorgängen im Magen ständig entstehenden Gase lebenswichtiger Akt ist. Scharf zu unterscheiden vom Erbrechen ist das Wiederkauen (s. u. S. 555).

Innervation. Der Brechakt steht unter der Herrschaft eines bestimmten in der Med. obl. gelegenen Zentrums, Brechzentrum. Oesophagotomierte Hunde üben, trotzdem das Erbrochene gar nicht bis zum Mund gelangt, die Brechbewegungen mit diesem aus. Die Erregung des Zentrums erfolgt durch direkte Reizungen (Giftwirkungen, Gehirnerschütterungen), ferner durch zentripetale Nerven des Schlundkopfes und des Zungengrundes (N. glossopharyngeus, vagus) des Magens (durch Erkrankungen, Ueberfüllung), des Uterus (Erbrechen Gravider) usw. Der Reflex zur Oeffnung der Cardia geht zentripetal in Bahnen des N. glossopharyngeus und des Vagus, zentrifugal ist er an Vagusbahnen gebunden (Valenti, Arch. exp. Path. u. Pharm., Bd. 63, 1910).

6. Ueberblick über die Besonderheiten in den Leistungen des Magens in der Tierreihe. 6a) Besonderheiten in bezug auf Zusammensetzung und Sekretion des Magensaftes. Eine vergleichende Betrachtung der Funktionen des Magens in der Tierreihe ist in der ausführlichen Weise, wie diese Funktionen für den Menschen und einige höhere Säugetiere in Vorstehendem geschildert worden sind, zurzeit noch nicht möglich. Im Vergleich zur Fülle des Unbekannten und Unerforschten sind die bekannt gewordenen Einzeltatsachen spärlich und außerdem widersprechen sie einander vielfach. Ehe auch nur ein einigermaßen umfassendes Bild der einzelnen Magenfunktionen in der Tierreihe erlangt werden kann, muß noch eine ungeheure Arbeit bewältigt werden. Es ist deshalb hier nur möglich, einige wichtige Besonderheiten in den Funktionen der Mägen gewisser Tiere kurz zu erörtern. Im übrigen muß auf die Handbücher und Werke der vergleichenden Physiologie besonders auf das grundlegende gewaltige Werk von Biedermann verwiesen werden.

Ueber die Zusammensetzung des reinen Magensaftes anderer Tiere ist nur wenig bekannt, da bei ihnen die allein reinen Magensaft garantierende Fistelmethodik nicht anwendbar oder noch nicht angewendet worden ist. Es liegen deshalb nur Untersuchungen von Extrakten der Magenschleimhaut sowie von mehr oder weniger verunreinigtem Magensaft vor. Diese haben ergeben, daß bei den daraufhin untersuchten Vertebraten Pepsin und Labferment (Ausnahme: Didelphys soll nach Ducchesi kein Lab sondern nur Pepsin im Magen produzieren) regelmäßige Bestandteile des Magensaftes sind und daß dieser auch stets sauer und zwar in den meisten Fällen durch HCl reagiert.

In quantitativer Beziehung bestehen aber sicher erhebliche Unterschiede, dies beweist schon die oben angeführte Analyse des Ziegenmagensaftes (s. S. 542), dessen Salzsäuregehalt ein viel geringerer ist wie z. B. der des Hundes. Teilweise wird dort sogar ein alkalischer und neutraler Saft abgesondert. Es ist nach den Versuchen von Ellenberger und Hofmeister (Arch. f. wiss. u. prakt. Tierhlkde., Bd. 7 bis 11, 1881 bis 1885) wahrscheinlich, daß auch der Magensaft von Schwein und Pferd eine geringere Salzsäurekonzentration als der der Carnivoren besitzt.

Was die Säure anlangt, so kommt nach Weinlands (Z. Biol., Bd. 41, 1901 und Bd. 55, 1911) Befunden im Magensaft von Haifischen (Scyllium) keine oder nur wenig freie Salzsäure vor, die daselbst herrschende stark saure Reaktion (bis 1,3%) dürfte dann auf saure Salze, vielleicht auch organische Säuren zurückzuführen sein. Bei anderen Selachiern (Raja) kann die Reaktion im Magen auch manchmal alkalisch sein.

Unterschiede in der Zusammensetzung des Magensaftes bestehen ferner bezüglich des Enzymgehaltes. Die Tiere, die eine große Cardiadrüsenzone in ihrem Magen besitzen, müssen noch andere Enzyme als Pepsin, Lab und Lipase im Magensafte haben. Beim Schwein, auf dessen große Cardiadrüsenzone schon oben hingeweisen wurde (s. S. 539), findet sich nach Ellenberger und Hofmeister sowie Bengen und Haane (Pflüg. Arch. Bd. 106, 1905) ein diastatisches Ferment daselbst. Bei einigen Fischen (Zeus, Scomber) dürfte im Magen noch ein anderes eiweißspaltendes Ferment, Trypsin, das bei den Säugern von der Bauchspeicheldrüse abgesondert wird, produziert werden (Krukenberg). Auch ist keineswegs sichergestellt, ob das sogenannte Pepsin des Fischmagens mit dem Pepsin der Säuger identisch ist, oder diesem nur nahesteht.

Beim Frosch wird nahezu das gesamte Pepsin schon von den Drüsen des Oesophagus, deren Sekret nicht sauer ist, produziert. Von der Magenschleimhaut wird ein stark salzsaurer

Saft abgesondert, der (namentlich der der Regio pylorica) nur wenig Pepsin enthält. Bei der Kröte hingegen liefert nur die Magenschleimhaut Pepsin (Grützner, Pflüg. Arch., Bd. 106, 1905).

Ueber die Sekretion und die sie bewirkenden und beeinflussenden Reize ist bei anderen Tieren als Carnivoren nur sehr wenig bekannt. Beim Pavian und dem Schwein scheinen die Verhältnisse ganz ähnlich wie bei Mensch und Carnivoren zu liegen (Meier und Bickel, Med. Klin. 1906), hingegen zeigt der Ablauf der Sekretion beim Wiederkäuer wesentliche Abweichungen (Bickel, Berl. klin. Woch. 1905). Bei diesen mit vierteiligen Mägen ausgerüsteten Tieren erfolgt die Füllung des Drüsenmagens in ganz anderer Weise wie bei den Tieren mit einhöhligem Magen (vgl. S. 555). Der Drüsenmagen ist dauernd gefüllt, also stets in Tätigkeit und erhält während der häufigen Wiederkauperioden und auch sonst (dann allerdings nur in kleinen Portionen) neues Material. Es ist deshalb die Magensaftabsonderung eine kontinuierliche, während der Nahrungsaufnahme steigt die Saftmenge an und der während des Hungerns alkalische Saft wird sauer. Das Wiederkauen ist dagegen ohne Einfluß. Es besteht für mich kein Zweifel, daß auch die Magensaftabsonderung bei anderen Pflanzenfressern z. B. Pferd, Nager usw. in mancher Hinsicht von der der Carnivoren abweicht, schon deshalb, weil bei diesen Tieren normaliter kaum eine völlige Leerung des Magens zwischen zwei Mahlzeiten vorkommt.

Ferner dürften auch psychische Reize bei vielen Tieren viel weniger bei der Erregung der Saftabsonderung mitwirken als bei dem intelligenten Hund. Es ist klar, daß diese und andere Beziehungen, sobald auf geringerer Entwicklungsstufe stehende Tiere in Frage kommen, von wesentlichem Einfluß sein müssen.

6b) Besonderheiten bezüglich der Mechanik. Die Mechanik der einhöhligen Mägen wird im großen und ganzen dieselbe sein wie die des menschlichen Magens, das zeigen die Versuche an Pferden, Hunden, Katzen, Kaninchen, Ratten und Fröschen, von Ellenberger, Cannon, Grützner (Pflüg. Arch., 106, 1905), Scheunert (Pflüg. Arch., 114, 1906) u. a.

Kleine Unterschiede bestehen sicher aber auch hier. Im Magen des Hundes besteht nach dreistündiger Verdauung eine ganz charakteristische Anordnung des Inhaltes (vgl. Fig. 34), die man stets, gleiche Fütterung vorausgesetzt, erhält und welche die Wirkung der Antrumperistaltik (Durchmischung des Inhaltes daselbst) deutlich erkennen läßt. Beim Pferde findet man etwas derartiges niemals. Hier sind die Wellen nicht so tief und der aus Vegetabilien bestehende feste Inhalt des Antrums läßt sich nicht so gründlich durchmischen oder abschnüren. Ferner tritt beim Pferde als Folge der Getränkaufnahme eine eigenartige Verlagerung des Mageninhaltes auf, die offenbar durch die besonders muskulöse Wand der Vormagenabteilung bewirkt wird. Beim Hunde, dessen Magen ähnliche Einrichtungen nicht besitzt, fehlt ein derartiger Mechanismus (Scheunert Pflügers Arch. Bd. 144 S. 411 und 569. 1912).

Sobald komplizierte Magenformen in Frage kommen, ist die Anfüllung des Magens und sein Bewegungsmodus sicher höchst verschieden.

α) Mechanik des Hamstermagens (Scheunert, Pflüg. Arch., Bd. 121 (1909), 139, 141 (1911)). Der zweihöhlige Hamstermagen ist nicht nur anatomisch sondern auch funktionell in 2 Abteilungen geschieden. Der Vormagen muß energische Kontraktionen ausführen, da die in seinem Innern liegenden Inhaltsmassen stets vermischt werden (Fig. 35). Die an seinem blinden Ende befindlichen Falten kutaner Schleimhaut sind wahrscheinlich dazu bestimmt, zerreibend auf den Inhalt zu wirken, sie sind also mit einer Kaumagenabteilung zu vergleichen (Roscher).

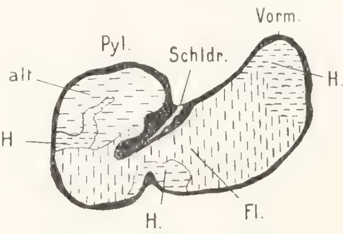


Fig. 35. Gefrierschnitt durch den Magen eines Hamsters, der erst Hafer H., dann Fleisch Fl. erhalten hatte und dann sofort getötet worden war. Vorm. Vormagen. Pyl. Ort des Pylorus. Schldr. Schlundrinne.

Der Drüsenmagen dürfte in seiner mechanischen Funktion dem einhöhligen Magen anderer Säugetiere entsprechen. In ihm ist eine deutliche Schichtung der Inhaltsmassen festzustellen (Fig. 35). Bei der Anfüllung tritt noch ein besonderer Mechanismus insofern zutage, als feste trockene Nahrungsmittel in der Hauptsache in den Vormagen gelangen, während weiche wasserreiche Nahrungsmittel in den Drüsenmagen oder die diesem benachbarten Teile des Vormagens transportiert werden. Hierbei hilft eine eigenartige, von der Einmündung des Oesophagus entlang der kleinen Kurvatur in den Drüsenmagen hineinführende mit kutaner Schleimhaut ausgekleidete Rinne (Fig. Schldr.) mit. Diese muß als physiologisches Analogon der Wiederkäuerspeiserinne betrachtet werden.

β) Mechanik der Wiederkäuermägen. Der Wiederkäuermagen besteht aus 3 Vormägen 1. Vormagen (Pansen, Wanst), 2. Magen (Haube, Netzmagen), 3. Magen (Psalter, Buch-, Blättermagen), die untereinander kommunizieren und mit kutaner, drüsenfreier Schleimhaut ausgekleidet sind. An sie schließt sich als 4. Magen der eigentliche Verdauungsmagen, der Drüsenmagen (Labmagen) an. Die Speiseröhre mündet an der Grenze zwischen 1. und 2. Magen in eine kuppelförmige Vorwölbung, den Haubenpansenvorhof, ein. Beide Mägen sind durch eine weite Oeffnung verbunden

Von der Speiseröhrenmündung zieht an der Haubeninnenfläche entlang eine von 2 seitlichen Wülsten (Lippen) begrenzte Rinne (Speiserinne) zu der engen schlitzförmigen Haubenpsalteröffnung und damit in den Psalter Am Boden desselben setzt sie sich in die Psalterrinne fort, die zur Psalterlabmagenöffnung und damit zum Labmagen führt. Speiserinne und Psalterrinne bilden so eine direkte Verbindung zwischen Speiseröhre und Labmagen.

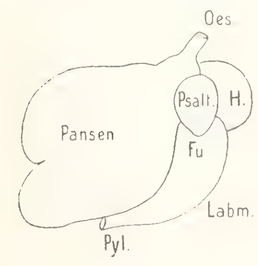


Fig. 36. Magen vom Schaf. Schematisch. Oes. Oesophagus, Speiseröhre; H. Haube, Netzmagen, 2. Magen; Psalt. Psalter, Buchmagen, 3. Magen; Labm. Labmagen, 4. Magen; Fu. Fundusdrüsenzone, Pyl. Pylorus.

Die eigenartige Funktion der Wiederkäuermägen besteht nun darin, daß die bei der Nahrungsaufnahme nur oberflächlich gekaute und eingespeichelte Nahrung zuerst in die beiden ersten Vormägen, hauptsächlich in den 1. Vormagen gelangt und erst nach Aufsteigen und erneutem Kauen in der Mundhöhle in den 3. und 4. Magen gelangen kann. Im ersten und zweiten Magen findet eine Durchmischung mit den stets reichlichen älteren Inhaltsmassen statt, die darin niemals fehlen. Zur Weiterbeförderung in den 3. und 4. Magen ist der Wiederkauakt erforderlich.

Der Wiederkauakt beginnt ½ bis 1¼ Stunde nach jeder Mahlzeit und findet zwischen den Mahlzeiten mehrmals statt. Jeder Akt — 5 bis 6 in 24 Stunden — dauert meist ³/₄ Stunden und zerfällt in 3 Phasen:

1. Die Rejektion des Bissens. Unter Mitwirkung der Bauchpresse bei Verharren in Inspirationsstellung drücken Kontraktionen des 1. und 2. Vormagens den Inhalt cardiawärts. Die hierdurch veranlaßte plötzliche und starke Füllung des Haubenpansenvorhofes mit Inhalt bewirkt einen Reiz, durch den reflektorisch Oeffnung der Cardia und Kontraktion des kleinen Haubenpansenvorhofes (früher Magenschlundkopf genannt) veranlaßt werden. Hierdurch wird der Inhalt in die Speiseröhre gedrückt und steigt in ihr durch antiperistaltische Bewegungen unterstützt als Ruminationsbissen empor.

2. Das gründliche Kauen und Einspeicheln erfolgt unter reichlicher Sekretion der Parotis bei sistierender Submaxillarsekretion.

3. Das Abschlucken des Wiedergekauten. Die abgeschluckten Bissen gelangen auf gewöhnlichem Wege zur Cardia und an den Eingang der Speiserinne und gehen, soweit sie dünnbreiig, wasserreich, feinzerkleinert sind, durch dieselbe direkt zur Haubenpsalteröffnung und treten in den Psalter ein. Größere Bissen hingegen können diesen Weg nicht nehmen, sondern fallen wieder in den 1. oder 2. Vormagen, um später nochmals wiedergekaut zu werden.

Betont sei, daß der Wiederkauakt ein zum Leben der Ruminantier notwendiger Akt ist, also keineswegs in Parallele mit dem Erbrechen oder der unter krankhaften Verhältnissen auftretenden Ruminatio humana zu stellen ist.

Ganz kurz seien noch die an den Wiederkäuermägen ablaufenden Bewegungen erörtert (Ellenberger).

Der 1. Magen, der durch starke muskulöse Pfeiler in Säcke zerlegt ist, führt normalerweise wellenförmige Bewegungen aus, die den wasserreichen Inhalt durchmischen und aus einem Sack in den anderen schaffen. Die Bewegungen sind sehr energisch und können deutlich durch die Bauchwand gefühlt und gehört werden.

Der 2. Magen kann sich sehr stark und zwar in seiner Gesamtheit kontrahieren, so daß man von einer Wellenbewegung nicht reden kann. Dabei verkleinert sich sein Volumen beträchtlich und die an seiner Innenfläche herabführende Speiserinne wird durch Kontraktion der Muskulatur ihres Bodens kürzer, ihre Lippen werden steifer und höher und können infolge der Kontraktion der Quermuskulatur der Rinne sich mit ihren oberen Wänden berühren, so daß die Rinne zu einem geschlossenen Rohre wird.

Der 3. Magen äußert nur sehr geringe und träge Bewegungen, die in wellenförmigen Kontraktionen bestehen und den Bewegungen der cardiaseitigen Magenregion einhöhliger Mägen gleichen dürften. Seine mechanische Funktion besteht darin, daß die zwischen seine mit Warzen und Papillen versehenen Blätter gelangten Massen von diesen fein gerieben und gepreßt und dann labmagenwärts geschoben werden.

Der 4. Magen führt dieselben Bewegungen wie der einhöhlige Magen anderer Säugetiere aus.

Die Innervation der Wiederkäuermagen (Ellenberger) erfolgt durch den N. vagus, nach dessen Durchschneidung aber nur eine vorübergehende Unterbrechung der Bewegungen stattfindet. Bald stellen sie sich wieder her, da sämtliche Mägen autonome Zentren besitzen. Der N. sympathicus hat hemmende Funktionen. Die Innervation des Wiederkauaktes ist unbekannt, jedenfalls steht fest, daß sein Ablauf dem Willen unterworfen ist.

γ) Die Mechanik des Vogelmagens. Die Mechanik des Magens der Vögel erfordert besonderes Interesse, da bei diesen Tieren der Magen vielfach einen eigenartigen muskulösen Nachmagen besitzt. Bei den Vögeln stehen sich, abgesehen von dem eine Art Vormagen darstellenden Kropfe vieler Vogelarten, zwei Magenformen als Extreme gegenüber. Die eine einfache Form (Gésier simple, Cuvier) ähnelt in vieler Hinsicht dem einhöhligen Magen der Säugetiere und ist den Raubvögeln sowie denjenigen, die Insekten, weiche Früchte u. dgl. fressen, eigen. Die andere

Magenform ist der zusammengesetzte Magen mit Muskelmagen (Gésier compliqué). An den regulären Drüsenmagen schließt sich als Nachmagen ein innen mit einer lederharten, dicken Schicht bedeckter Magen mit mächtiger Muskulatur an. Dieser ist als ein eigenartiges für mechanische Funktionen eingerichtetes Antrum pylori zu betrachten (Retzius). Die lederartige Schicht stellt das Drüsensekret dar. Einen solchen zusammengesetzten Magen haben in ausgesprochenster Weise die körnerfressenden Vögel. Je nach der naturgemäßen Nahrung schwankt der Magen der Vogelarten in seiner Ausbildung zwischen den beiden Extremen. Spallanzani unterschied noch einen sogenannten Mittelmagen, bei dem der muskulöse Nachmagen eine weniger mächtige Muskulatur besitzt.

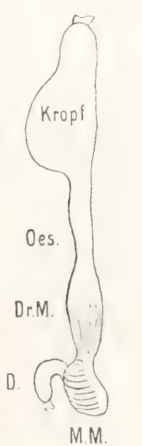


Fig. 37. Kropf und Magen vom Vogel (Psittacus). Oes. Oesophagus, Speiseröhre. Dr.M. Drüsenmagen. M.M. Muskelmagen. D. Darm.

Schon Réaumur und Spallanzani haben im 18. Jahrhundert die erstaunlichen Leistungen der Muskelmägen der Granivoren erkannt. Glasstücke, Bleirohre, Eisenröhren wurden zerrieben und zerdrückt und selbst scharf geschliffene Stahlklingen abgestumpft. Hierbei wirken die im Muskelmagen regelmäßig zu findenden Steine unterstützend mit, sind aber dazu nicht absolut nötig.

Ein Ueberblick über den Ablauf der Bewegungen bei den einzelnen charakteristischen Vogelmägen und über ihre Beziehungen zueinander ist den neuesten Untersuchungen von Mangold (Pflüg. Arch., Bd. 111, 1906; Bd. 138, 139, 1911) zu verdanken.

Bei Hühnern mit typischem Muskelmagen führt der Muskelmagen während der Verdauung rhythmische Bewegungen aus, deren Rhythmus 20 bis 30 Sekunden beträgt, und die durch eine abwechselnde Kontraktion zweier Muskelpaare (Zwischenmuskeln und Hauptmuskeln) hervorgerufen werden. Zunächst kontrahieren sich die Zwischenmuskeln, hierauf die beiden Hauptmuskeln. Hungern verlangsamt die Magentätigkeit. Auch hier ist der N. vagus der motorische Nerv, der neben erregenden auch hemmende Fasern führt. Außerdem sind autonome Zentren in der Magenwand vorhanden, welche auch nach Durchschneidung beider Vagi die Magentätigkeit, allerdings bei stark verlangsamten Rhythmus, unterhalten.

Bei Krähe und Dohle, Vögeln mit sogenanntem Mittelmagen, beträgt der Rhythmus der einander ohne Pause folgenden Magenbewegungen 11,9 (Krähe) und 13,4 (Dohle) Sekunden. Durch Hungerzustand oder Fütterung läßt sich bei diesen Tieren eine Beeinflussung des Rhythmus im Gegensatz zum Huhn, nicht konstatieren. Der Einfluß des N. vagus ist im großen und ganzen derselbe wie beim Huhn.

Auch der einfache Raubvogelmagen (Bussard) führt regelmäßige rhythmische Bewegungen aus. Der Rhythmus beträgt 22 bis 25 Sekunden, er läßt sich aber ebenso wie bei Dohle und Krähe in seinem zeitlichen Verlauf durch Hunger oder Fütterung nicht beeinflussen. Wohl aber wird die Höhe der Drucksteigerung durch Fütterung wesentlich vergrößert. Während im Hungerzustande der Magendruck 1 bis 4 mm Hg betrug, stieg er nach Fütterung auf 8 bis 26 mm. Auch bei leerem Magen scheint die rhythmische Tätigkeit anzudauern. Durch mechanische Reize (Steine, Knochen, Sand usw.) läßt sich dann die Intensität der Kontraktion ganz erheblich steigern. Von chemischen Reizen wirken Salzsäurelösungen in stärkeren als physiologischen Konzentrationen hemmend auf die Stärke, nicht aber auf den Rhythmus der Kontraktionen, ebenso Liebigs Fleischextrakt und Fleischpepton. Vielleicht spielen hier auch Chemoreflexe vom Darm aus eine Rolle. Nach allem scheint weitgehende Analogie mit dem Verhalten des einhöhligen Säugermagens zu bestehen.

7. Die Bedeutung des Magens für die Verdauung. Die Vorgänge der Magenverdauung werden eingehend im Artikel „Verdauung“ behandelt werden. Hier sei nur zusammenfassend und lediglich in bezug auf den eigentlichen Drüsenmagen bemerkt, daß seine Bedeutung in chemischen als auch mechanischen Funktionen zu suchen ist.

In chemischer Hinsicht hat der Magen wichtige vorbereitende Aufgaben zu erfüllen. Besonders tritt dies in seiner Beteiligung an der Eiweißverdauung hervor. Hierbei baut er die verdaulichen Eiweißkörper der Nahrung zu Verbindungen ab, die außerordentlich leicht und rasch von den Fermenten des Darmes weiter zerlegt werden können, viel leichter und schneller als dies die ursprünglichen Eiweißkörper der Nahrung werden, die zum Teil für die Darmfermente nur sehr schwer angreifbar sind. Eine ebenso wichtige Rolle spielt er bei der Kohlehydratverdauung der Herbi- und Omnivoren, in deren Magen das stärkespaltende Ferment des Speichels eine ausgiebige Wirkung entfaltet und so ebenfalls der endgültigen Aufspaltung der Kohlehydrate im Darm vorarbeitet, sie erleichtert und zum Teil überhaupt schon selbst übernimmt. Auch bei der Fettverdauung wirkt er unterstützend.

In mechanischer Hinsicht dient der Magen in erster Linie als Füllapparat des Darmes. Er regelt die Darmfüllung und sorgt dafür, daß diesem stets nur kleine Portionen, die sofort rasch weiter verdaut und resorbiert werden können, zugeführt werden. Die Bedeutung dieser Funktionen tritt deutlich in der so überaus fein nach Beschaffenheit des Magen- und Darminhaltes geregelten Entleerung des Magens zutage.

Der Magen ist nicht unentbehrlich, wenigstens beim Menschen und Carnivoren beweisen die Erfahrungen, daß magenlose Individuen weiter zu leben vermögen, sofern die nötige Sorgfalt bezüglich Zufuhr und Zusammensetzung der Nahrung geübt wird. Solche Versuche dürfen nicht zu einer Unterschätzung des Magens führen, sie beweisen nicht, daß er unnütz ist, sondern nur, daß der Körper in ausgezeichneter Weise zweckmäßig eingerichtet ist, daß er selbst wichtige Organe entbehren und sie durch die Funktionen anderer ersetzen kann.

Literatur. ***E. Abderhalden***, *Lehrb. der physiolog. Chemie. Berlin und Wien 1910.* — ***Derselbe***, *Abbau der Proteine in Oppenheimer's Hdb. d. Bioch. I, 1909.* — ***A. Bickel***, *Magen und Magensaft. Oppenheimer's Hdb. d. Bioch., Jena, Bd. III 1, 1910.* — ***W. Biedermann***, *Verdauung. Winterstein's Hdb. d. vgl. Physiologie, Jena.* — ***W. B. Cannon***, *The Mechanical Factors of Digestion. London 1911.* — ***O. Cohnheim***, *Physiologie der Verdauung und Ernährung. Berlin-Wien 1908.* — ***W. Ellenberger***, *Handbuch d. vgl. Physiologie der Haussäugetiere. Berlin, Bd. I, 1890.* — ***Derselbe***, *Handbuch der vgl. mikroskop. Anatomie. Berlin 1911, Bd. III.* — ***W. Ellenberger und A. Scheunert***, *Lehrbuch d. vgl. Physiologie der Haussäugetiere. Berlin 1910.* — ***W. Grimmer***, *Chemie und Physiologie der Milch. Berlin 1910.* — ***O. Hammarsten***, *Lehrbuch der physiolog. Chemie. Wiesbaden 1910.* — ***R. Metzner***, *Die histologischen Veränderungen der Drüsen bei ihrer Tätigkeit. Nagel's Hdb. d. Physiologie, Braunschweig, Bd. II 2, 1907.* — ***A. Oppel***, *Lehrbuch der mikroskop. Anatomie 1896, Bd. I, Magen.* — ***C. Oppenheimer***, *Die Fermente und ihre Wirkungen. Leipzig 1909.* — ***J. P. Pawlow***, *Die Arbeit der Verdauungsdrüsen. Wiesbaden 1898.* — ***Derselbe***, *Die äußere Arbeit der Verdauungsdrüsen und ihr Mechanismus. Nagel's Hdb. d. Physiol., Bd. II 2, Braunschweig 1907.* — ***G. Pöschmann***, *Ueber den Magenmechanismus. Eine geschichtliche Studie. Diss. Zürich, Dresden 1910.* — ***A. Scheunert***, *Besonderheiten der Verdauung bei Tieren mit mehrhöhligen Mägen (Wiederkäuern), Kaltblütern und Vögeln. Oppenheimer's Hdb. d. Bioch., Jena, Bd. III 2, 1909.* — ***E. Weinland***, *Verdauung und Resorption bei Wirbellosen. Oppenheimer's Hdb. d. Bioch., Jena, Bd. III 2, 1909.* — ***E. Zunz***, *Die Eiweißverdauung im Magen. Ergeb. d. Physiol., Wiesbaden, Bd. 5, 1905.*

A. Scheunert.

Magendie
Francois.

1783 bis 1855, der ruhmreichste Experimentalphysiologe der Neuzeit, als Sohn eines Wundarztes in Bordeaux geboren, machte seine Studien in Paris, wurde 1803 Interne, promovierte 1808, war dann Prosektor der medizinischen Fakultät, Dozent der Anatomie und Physiologie, widmete sich seit 1816 gänzlich der experimentellen Physiologie und war Arzt am Bureau central und seit 1826 Médecin adjoint der Salpêtrière. 1836 wurde er als Nachfolger Récamiers Professor der Physiologie und allgemeinen Pathologie am Collège de France, Mitglied des Instituts, 1836 Vizepräsident. Magendie starb in Sannois bei Paris. Von ihm rührt der Ausspruch her: La physiologie est une science à faire. Er war begeisterter Verteidiger des Experiments, in dem er allein die Quelle der Erkenntnis sah. Den zu seiner Zeit noch vorherrschenden Vitalismus lehnte er mit Entschiedenheit ab. Es gibt kein Kapital der Physiologie, das er nicht mit bahnbrechenden Experimenten bereichert und erheblich umgestaltet hat, so die Lehre von der Absorption, vom Herz, von der tierischen Wärme, Verdauung, die Nervenphysiologie. Auch die allgemeine Pathologie, Toxikologie und Pharmakodynamik verdankt seinen Forschungen verschiedene Fortschritte. U. a. führte er die Begriffe der Pyämie, Ichorrhämie und Metastasen im neueren Sinne ein und befaßte sich mit Untersuchungen über Alkaloide, die er in der Praxis zuerst verwertete. Die Zahl seiner Veröffentlichungen ist beträchtlich. Sie sind von Claude Bernard in Magendie Biographie zusammengestellt.

Literatur. *Biogr. Lex. ed. Hirsch.*

J. Pagel.

Magma.

Die Bezeichnung für die feurig-flüssigen Massen, aus denen die Eruptivgesteine entstehen (siehe den Artikel „Mineralbildung").

Magnete.

1. Geschichtliche Einleitung: a) Natürliche Magnete. b) Künstliche Magnete. 2. Grundzüge der elementaren Theorie: a) das Gesetz von Coulomb. b) Magnetische Feldstärke. c) Magnetisches Potential. d) Magnetische Energie. e) Magnetisches Moment. f) Polstärke und Polabstand. g) Die Magnetisierung. 3. Der Einfluß der Materie in der elementaren Theorie: a) Die Permeabilität. b) Die induzierte Magnetisierung. c) Ellipsoid im gleichförmigen Felde. Entmagnetisierender Faktor. d) Die Permeabilität der Magnete. e) Magnetische Induktion. f) Der permanente Ringmagnet. 4. Die Theorie mit Rücksicht auf die Eigenschaften der ferromagnetischen Körper: a) Die Magnetisierungskurve. b) Energieverlust durch Hysterese. c) Der Sättigungswert der Magnetisierung. d) Remanenz und Koerzitivkraft. e) Umkehrbare magnetische Vorgänge. f) Tragkraft der Magnete. 5. Eigenschaften und Herstellung permanenter Magnete: a) Einfluß der Form. b) Das Altern. c) Die Wahl des Stoffes und des Härtungsgrades. d) Lamellarmagnete.

1. Geschichtliche Einleitung. 1a) Natürliche Magnete. Die ersten Berichte über Magnete stammen aus den sagenreichen Anfängen der Geschichte. Den Chinesen soll der Gebrauch des Kompasses schon in vorchristlicher Zeit bekannt gewesen sein;

ägyptischen Priestern wird die Kenntnis der anziehenden Kräfte des Magneteisensteines auf Eisenstücke nachgesagt. Die ersten zuverlässigen Nachrichten verdanken wir den alten Griechen. Thales erwähnt den „Stein von Heraklea" (λίθος ἡράκλεια), benannt nach der lydischen Stadt Heraklea, bei der sich Fundorte von Magneteisenstein befinden. Auch Homer kennt die Anziehung, die dieses Mineral (Eisenoxyduloxyd) auf Eisenstücke ausübt; Anaxagoras und Pythagoras erwähnen sie gleichfalls, und Hippocrates führt den Magnet in die Heilkunst ein. Seit Plato, der von dem „Stein von Magnesia" (μαγνῆτις λίθος) spricht, bürgert sich der Name Magnet ein. Plinius (Nat. Hist. Lib. XXXVI c. 16, c. 25) erzählt dagegen die Fabel vom Viehhirt Magnes, der auf dem Berge Ida an einen Ort kam, wo die Nägel seiner Schuhe und die Eisenspitze seines Stockes vom Boden angezogen wurden; er grub nach und fand einen Stein, der das Eisen anzog und nach dem Entdecker den Namen Magnet erhielt. Plinius berichtet am gleichen Orte auch, daß der Magnetstein dem Eisen seine anziehende Kraft mitteilt; daneben findet sich freilich auch die unzutreffende Angabe, daß der Diamant dem Magnete alle anziehende Kraft raube.

Im Mittelalter wurde neben dem Namen „Magnet" für den natürlichen Magnetstein auch die Bezeichnung „Adamas" (ursprünglich = Diamant) gebraucht, woher das französische Wort aimant für den Magnet stammt.

Aus dem elften und zwölften Jahrhundert liegen glaubwürdige Berichte vor, daß isländische, französische und italienische Seefahrer den Kompaß benützt haben; Thevenot (Recueil des Voyages, Paris 1681) gibt an, er habe aus einem Schreiben des Peter Adsigerius ersehen, daß dieser im Jahre 1269 eine Abweichung der Magnetnadel von der Nordsüdrichtung (Deklination) wahrgenommen habe. Der Engländer R. Norman entdeckte 1567 die Inklination der Magnetnadel (Kircheri ars magnetica, Cöln 1673). William Gilbert schrieb 1600 ausführlich über den Magnetismus; er stellte kugelförmige Magnete her (terellae), an denen er den Erdmagnetismus studieren wollte. Halley zeichnete 1700 die erste Erdkarte mit den Linien gleicher Deklination; zur Erklärung des Verlaufs dieser Linien nahm er vier magnetische Erdpole an, von denen je zwei in der Nähe jedes geographischen Poles liegen sollten.

Der natürliche Magnetismus des Magneteisensteines zeigt sich besonders stark an den Stücken des Minerals, die schon eine Weile zutage gelegen haben. In geringerem Maße weisen auch einige Porphyr- und Serpentinarten natürlichen Magnetismus auf.

Das Magneteisenerz (hauptsächlich Fe_3O_4) kristallisiert in regulären Oktaedern, kommt aber meist in kristallinischen Massen, namentlich in Skandinavien und Chile vor.

1b) Künstliche Magnete. Es ist frühzeitig bemerkt worden, daß Eisenstücke, die mit natürlichen Magneten in Berührung gekommen waren, mitunter etwas Magnetismus zurückbehielten. Um die Mitte des 17. Jahrhunderts fand de la Hire, daß ein Eisendraht, der in der Meridianebene so aufgestellt war, daß seine Nordspitze um 60 Grad nach unten geneigt war, nach 10 Jahren magnetische Eigenschaften aufwies. 1728 zeigte du Fay, daß ein senkrecht aufgehängter Eisenstab durch Schlagen mit dem Hammer am unteren Ende einen Nordpol erhielt und daß nach Umkehrung des Stabes die Polarität durch erneutes Schlagen umgekehrt werden konnte.

Im Jahre 1729 entdeckte Servington Savary, daß gehärteter Stahl zur Herstellung künstlicher Magnete besonders geeignet ist. Er gab auch ein gewisses Verfahren an, nach dem unmagnetische Stahlstücke durch Streichen mit natürlichen oder künstlichen Magneten magnetisch gemacht werden können. Das Streichverfahren wurde in der Folgezeit eifrig untersucht; Knight, Canton, Michell, Aepinus, du Hamel und andere gaben eigene Arten des Striches an. Die Wissenschaft verdankt diesen Forschungen manches wertvolle Ergebnis; freilich wurde auch gerade hier durch Verbindung von zufälligen Versuchsergebnissen mit irrtümlichen Spekulationen oft Verwirrung gestiftet. Heute werden die Streichmethoden kaum mehr angewendet, nachdem man im elektrischen Strome ein weit besseres Mittel zur Herstellung von Magneten gefunden hat (Abschnitt 5a). Schon im Jahre 1681 wurde beobachtet, daß ein in der Nähe einer Magnetnadel niedergehender Blitzstrahl deren Polarität umkehrte (Phil. Transact. Nr. 157, S. 520). 1820 magnetisierte Arago Stahlnadeln, indem er sie in eine stromdurchflossene Drahtspule brachte. Der erste Elektromagnet aus weichem Eisen wurde 1825 von Sturgeon gebaut (Transact. of the Soc. of Arts 1825).

Als günstigste Formen für künstliche Dauermagnete haben sich Stab- und Hufeisenformen erwiesen. Knight wies zuerst darauf hin, daß große Magnete vorteilhaft aus mehreren aufeinander geschichteten gesondert magnetisierten Blättern hergestellt werden (magnetisches Magazin). Später haben besonders Scoresby und Jamin eingehende Untersuchungen über diese geblätterten Magnete angestellt (Abschnitt 5d).

Bevor auf die Herstellung und die Eigen-

schaften künstlicher Magnete näher eingegangen wird, soll zunächst ein kurzer Abriß der Theorie gegeben werden,[1]) soweit diese für die Erörterung jener Fragen unerläßlich ist.

2. Grundzüge der elementaren Theorie. 2a) Das Gesetz von Coulomb. Coulomb fand, daß lange, gleichförmig magnetisierte Stahlnadeln in einiger Entfernung voneinander sich so verhalten, als ob Kräfte nur von ihren Enden ausgingen. Da sich jede dieser Nadeln, fern von den übrigen frei drehbar aufgehängt, ungefähr in die Nordsüdrichtung einstellt, wobei immer dasselbe Ende nach Norden weist, so muß dieses Nordende, kurz Nordpol genannt, von dem anderen, dem Südpol unterschieden werden. Für die Kraft f zwischen zwei Polen (Abstoßung bei gleichnamigen, Anziehung bei ungleichnamigen) stellte Coulomb den Ausdruck

$$f = \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

auf. r ist der Abstand der beiden Pole; m_1 ist eine nur von der magnetischen Beschaffenheit des einen Pols abhängige Konstante; m_2 bezieht sich in entsprechender Weise auf den anderen Pol. Man nennt die m die magnetischen Mengen der betreffenden Pole oder auch die Polstärken (vgl. Abschnitt 2 f). In Gleichung (1) sind die magnetischen Mengen m_1 und m_2 punktförmig gedacht. Strenggenommen kann sich in jedem Punkte nur eine unendlich kleine Menge dm befinden. Je zwei von ihnen wirken nach (1) aufeinander mit einer Kraft

$$df = \frac{dm_1\, dm_2}{r^2} \quad \ldots\ldots \quad 1a)$$

Die magnetischen Mengen können räumlich und flächenhaft verteilt sein. Befindet sich im Raumelement $d\tau$ die Menge

$$dm = \varrho d\tau \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2a)$$

und auf dem Flächenelement dS die Menge

$$dm = \sigma dS, \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2b)$$

so heißt ϱ die Raumdichte und σ die Flächendichte des Magnetismus.

Rechnet man die nordmagnetischen Mengen als positive, die südmagnetischen Mengen als negative Größen, so lehrt die Erfahrung, daß für jeden einzelnen Magnet die algebraische Summe aller magnetischen Mengen verschwindet:

$$\Sigma m = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Mit anderen Worten: Jeder Magnet enthält gleichviel Nord- und Südmagnetismus.

2b) Magnetische Feldstärke. Für die Gültigkeit des Coulombschen Gesetzes (1) muß vorausgesetzt werden, daß sich die Magnete in Luft (strenggenommen im Vakuum), insbesondre auch fern von Eisenmassen befinden. Ist dann die eine Menge $m_2=1$, so wird

$$f = \mathfrak{H} = \frac{m_1}{r^2} \quad \ldots\ldots \quad 1b)$$

Diese „Kraft auf die (nord)magnetische Menge Eins" nennt man kurz die am Orte P_2 dieser Menge herrschende „magnetische Feldstärke". Man will mit diesem Ausdruck — unabhängig von dem etwaigen Vorhandensein der Probemenge m_2 — den besonderen physikalischen Zustand im Punkte P_2 kennzeichnen. Die magnetische Feldstärke ist eine gerichtete Größe, ein „Vektor"; befindet sich außer m_1 keine weitere magnetische Menge im Raume, so fällt die Richtung der Feldstärke mit der des Radiusvektors r zusammen, der von dem Ort P_1 der Menge m_1 nach dem betrachteten Punkte P_2 gezogen ist. Der ganze Raum, in dem die magnetische Feldstärke merkliche Werte hat, heißt das „magnetische Feld". Die Konfiguration dieses Feldes kann man sich in bekannter Weise durch ein System von Feldlinien veranschaulicht denken, deren Richtung überall die Richtung der Feldstärke $\mathfrak{H}$ angibt. Die Feldlinien einer einzelnen punktförmigen Menge m_1 sind daher Gerade, die von m_1 aus nach allen Seiten strahlenförmig in den Raum hinausgehen, etwa wie die Strahlen einer punktförmigen Lichtquelle. Ist m_1 eine nordmagnetische Menge, so spricht man davon, daß die Feldlinien „von m_1 ausgehen"; bei einer südmagnetischen Menge sagt man umgekehrt, daß die Feldlinien ihr „zustreben", oder „auf ihr einmünden". Die so bezeichnete Richtung der Feldlinien gibt also die Richtung an, in der eine freibewegliche nordmagnetische Probemenge sich längs dieser Linien bewegen würde.

Wie unter 2a erwähnt, verhält sich ein langer dünner Magnetstab ungefähr so, als ob lediglich in seinen Enden oder Polen magnetische Mengen säßen; ist m die Menge des Nordpols, so muß nach Gleichung (3) die Menge des Südpols gleich — m sein. Die Feldlinien eines solchen Polpaars verlaufen sämtlich in den durch die Stabachse gelegten Meridianebenen. Den Verlauf dieser Linien in einer dieser Ebenen zeigt Figur 1 (stark ausgezogene Linien). Die Konstruktion ergibt sich aus folgendem Satze:

Die Feldstärken mehrerer gleichzeitig vorhandenen magnetischen Mengen setzen sich zusammen wie die Kräfte der Mechanik:

[1]) Im wesentlichen nach der von E. Cohn in seinem Buche „Das elektromagnetische Feld" gegebenen Darstellung. In den Artikeln „Magnetfeld" und „Magnetische Influenz" dieses Handbuches wird die Theorie des Magnetismus ausführlicher behandelt.

die Feldstärke in irgend einem Punkte P ist die geometrische Resultierende der von den einzelnen Mengen für sich in P erzeugten Feldstärken.

Die magnetischen Feldlinien lassen sich durch Eisenfeilspäne veranschaulichen. Legt man auf den Magnet ein Blatt Papier und streut Eisenfeilspäne darauf, so ordnen sich diese in Kurven an, die den Feldlinien entsprechen.

Wird eine Fläche S von den Feldlinien senkrecht durchschnitten, so nennt man das Produkt $\mathfrak{H}S$ den durch die Fläche tretenden Fluß von $\mathfrak{H}$. Hierbei ist angenommen, daß $\mathfrak{H}$ überall auf der Fläche denselben Wert habe. Trifft dies nicht zu, so kann man immer die Fläche in kleine Teile dS zerlegen, so daß $\mathfrak{H}$ innerhalb jedes dieser Teile überall merklich denselben Wert hat. Dann ist der Gesamtfluß gleich der Summe der Teilflüsse

$$\Sigma\, \mathfrak{H}dS = \mathfrak{H}_1 dS_1 + \mathfrak{H}_2 dS_2 + \ldots\ldots$$

Bildet $\mathfrak{H}$ mit der Normalen auf dS den Winkel α, so wird der Fluß gleich

$$\Sigma\, \mathfrak{H} \cos\alpha\, dS \text{ oder } \Sigma\, \mathfrak{H}_N\, dS,$$

wo $\mathfrak{H}_N$ die Komponente der Feldstärke in Richtung der Normalen N bedeutet. Die in die Fläche dS fallende (tangentiale) Komponente des Feldes trägt also nichts zu dem Flusse durch diese Fläche bei.

Durch geometrische Betrachtungen läßt sich zeigen, daß der aus einer geschlossenen Fläche S austretende gesamte Fluß von $\mathfrak{H}$ gleich der 4π-fachen Gesamtmenge von Magnetismus ist, die sich in dem von der Fläche S umschlossenen Raume befindet:

$$\Sigma\, \mathfrak{H}_N\, dS = 4\pi \Sigma m = 4\pi \Sigma \varrho d\tau \quad \ldots\ldots 4)$$

darin ist $d\tau$, wie in Gleichung (2a), ein Raumteilchen innerhalb S, ϱ die räumliche magnetische Dichte innerhalb $d\tau$. Zeichnet man die $\mathfrak{H}$-Linien überall in solcher Dichte, daß diese zugleich den Betrag von $\mathfrak{H}$ mißt, so kann man der Gleichung (4) auch den folgenden Ausdruck geben: Auf jeder Nordmenge von der Größe 1 entspringen 4π $\mathfrak{H}$-Linien; auf jeder Südmenge 1 münden ebensoviele $\mathfrak{H}$-Linien ein.

2c) Magnetisches Potential. Sind die magnetischen Mengen in beliebiger Weise verteilt und in größerer Anzahl vorhanden, so wird die Berechnung der Feldstärke $\mathfrak{H}$ als Resultierende der von den einzelnen Mengen gelieferten Beiträge recht mühsam. Bequemer ergibt sich die resultierende Feldstärke unmittelbar aus dem magnetischen Potentiale:

$$\psi = \Sigma \frac{m}{r} \quad \ldots\ldots 5)$$

Dieses ist also zunächst lediglich eine Rechnungsgröße. Die Feldstärke $\mathfrak{H}$ ergibt sich als das räumliche Gefälle des Potentiales. Es ist üblich, das negative Gefälle oder den Anstieg einer Größe als ihren „Gradienten“ zu bezeichnen. $\mathfrak{H}$ ist also der negative Gradient des Potentiales ψ, oder in Zeichen

$$\mathfrak{H} = -\operatorname{grad} \psi \quad \ldots\ldots 6)$$

Daraus ergibt sich die Regel, daß die Richtung der Feldstärke zugleich die Richtung ist, in der sich das Potential am stärksten ändert. In den zu $\mathfrak{H}$ senkrechten Richtungen ändert sich das Potential überhaupt nicht. Flächen, die von den $\mathfrak{H}$-Linien überall senkrecht durchschnitten werden, sind also zugleich Flächen konstanten Potentiales oder Niveauflächen. Ihr Verlauf für ein einfaches Polpaar ist aus Figur 1 ersichtlich:

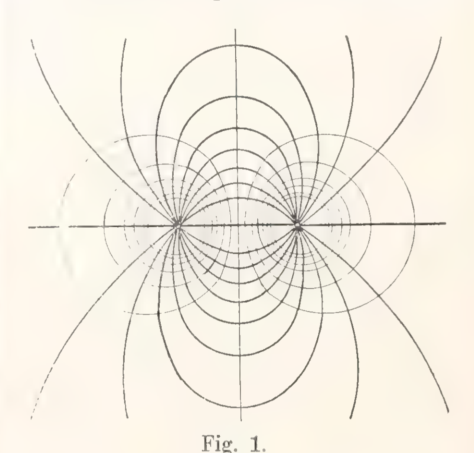


Fig. 1.

die weniger stark ausgezogenen Kurven zeigen den Durchschnitt der Zeichenebene mit den Niveauflächen; diese selbst sind die Rotationsflächen, die entstehen, wenn man die dünn ausgezogenen Kurven um die Verbindungslinie der beiden Pole rotieren läßt.

2d) Magnetische Energie. Wir multiplizieren jede magnetische Menge m mit der Hälfte des am Ort von m herrschenden Potentiales ψ und addieren die erhaltenen Beträge für sämtliche in dem magnetischen Felde enthaltenen Mengen:

$$W_m = \frac{1}{2} \Sigma m\psi \quad \ldots\ldots 7)$$

Die so erhaltene Größe hat die folgende Eigenschaft. Ist W_{m1} ihr Wert für eine bestimmte Lage 1 der Mengen, W_{m2} ihr Wert für eine andere Lage 2 dieser Mengen, so ist

$$A = W_{m1} - W_{m2} \quad \ldots\ldots 8)$$

die beim Uebergang von der Lage 1 zur Lage 2 von den magnetischen Kräften geleistete mechanische Arbeit. Man ist also berechtigt, die Größe W_m als die magnetische Ener-

gie des Systems der magnetischen Mengen m anzusprechen.

Ein bestimmter Magnet mit den Mengen m_1 soll ein Feld erzeugen, dessen Potential mit ψ_1 und dessen Energie mit $W_{m\,1}$ bezeichnet sei. Für einen zweiten Magnet mögen die entsprechenden Größen m_2, ψ_2, $W_{m\,2}$ sein. Dann folgt aus der das Potential definierenden Gleichung (5), daß das von den beiden zugleich vorhandenen Magneten herrührende gemeinsame Feld das Potential

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 9)$$

und die Energie

$$W_m = \frac{1}{2}\Sigma(m_1+m_2)(\psi_1+\psi_2)$$
$$= W_{m\,1} + W_{m\,2} + R,$$

mit

$$R = \frac{1}{2}\Sigma(m_1\psi_2 + m_2\psi_1) = \Sigma m_1\psi_2 = \Sigma m_2\psi_1 \,..\, 10)$$

besitzt. R heißt die wechselseitige Energie der beiden Magnete. Sie allein ändert sich, wenn die beiden Magnete als starre Körper gegeneinander verschoben werden. War die wechselseitige Energie vor der Verschiebung R_1, nachher R_2, so ist die dabei von den Feldkräften geleistete mechanische Arbeit

$$A = R_1 - R_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 8a)$$

Durch eine rein mathematische Umformung, auf die hier nicht eingegangen werden kann, läßt sich zeigen, daß der Ausdruck (7) gleichwertig ist dem folgenden:

$$W_m = \frac{1}{8\pi}\Sigma\mathfrak{H}^2 d\tau \quad \ldots\ldots\ldots \quad 7a)$$

Darin ist $d\tau$ ein Raumteilchen, $\mathfrak{H}$ die in ihm bestehende Feldstärke; die Summierung ist über sämtliche Raumteile des ganzen Feldes auszudehnen. Der Gleichung (7a) läßt sich nach dem Vorgange Maxwells der Sinn unterlegen, daß bei der Feldstärke $\mathfrak{H}$ in der Raumeinheit der Energiebetrag $\frac{1}{8\pi}\mathfrak{H}^2$ aufgespeichert ist (Energiedichte).

2e) Magnetisches Moment. Bei der Betrachtung der Ablenkung, die eine Magnetnadel in dem Felde der Erde oder eines anderen Magnets erfährt, geht der Begriff des „magnetischen Momentes" der Nadel ein. Man versteht unter dem magnetischen Moment eines einfachen Polpaares von der Polstärke m und dem Polabstand s das Produkt

$$\mathfrak{K} = ms \quad \ldots\ldots\ldots \quad 11a)$$

und gibt diesem Produkt die Richtung der vom Südpol $-m$ nach dem Nordpol $+m$ gezogenen geraden Verbindungslinie. Handelt es sich um einen Magnetstab mit irgendwie verteilten magnetischen Mengen, so denkt man sich von einem beliebig angenommenen Punkte P die Radiusvektoren $\mathfrak{r}$ nach den einzelnen Mengen m gezogen und in jedem Radius eine Kraft $m\mathfrak{r}$ angebracht. Die geometrische Resultierende aller dieser Kräfte

$$\mathfrak{K} = \Sigma m\mathfrak{r} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 11)$$

ist das magnetische Moment des Magnets. Aus der Tatsache, daß ebensoviel positiver wie negativer Magnetismus vorhanden ist, ergibt sich, daß für $\mathfrak{K}$ unabhängig von der Wahl des Punktes P immer derselbe Wert (nach Größe und Richtung) herauskommen muß. Das magnetische Moment ist also für jeden Magnet eine nur von seiner Gestalt und der Verteilung seiner magnetischen Mengen abhängige Größe. In einem gegebenen Magnet bestimmt es eine in ihm festliegende Richtung; dagegen kann man nicht von einer magnetischen Achse sprechen, da (wegen der beliebigen Wahl des Bezugspunktes P) der Vektor $\mathfrak{K}$ in jede zu der genannten Richtung parallele Gerade verlegt werden kann.

Wird die Magnetnadel in ein homogenes Feld $\mathfrak{H}$ gebracht, so ergibt sich für die wechselseitige Energie zwischen der Nadel und dem Magnet (oder dem Magnetsystem), von dem das homogene Feld herrührt, der Ausdruck

$$R = -\mathfrak{K}.\mathfrak{H}.\cos\alpha \quad \ldots\ldots \quad (10a)$$

α ist der Winkel, den die Richtung des magnetischen Moments $\mathfrak{K}$ mit der Richtung des Feldes $\mathfrak{H}$ einschließt.

Verschiebt man den Magnet sich selbst parallel, so ändert sich weder $\mathfrak{K}$, noch $\mathfrak{H}$, noch α, also auch nicht R. Die bei dieser Verschiebung geleistete mechanische Arbeit ist somit null, und daraus folgt, daß auf den Magnet in dem homogenen Felde keinerlei verschiebende Kräfte einwirken; er erfährt lediglich drehende Kräfte.

Das gleichförmige Feld $\mathfrak{H}$ möge von einem Einheitspole ($m_2 = 1$) in dem sehr fernen Punkte P_2 herrühren, dessen Abstand von einem Punkte P_1 des Magnets wir r nennen. Dann ist

$$\mathfrak{H} = \frac{1}{r^2}$$

und nach (10)

$$R = \{\psi_1\}_{\text{in } P_2}$$

Setzt man hierin anderseits für R den Ausdruck (10a) und bedenkt, daß $\mathfrak{H}$ in die Richtung von $-r$ fällt, so folgt

$$\{\psi_1\}_{\text{in } P_2} = \frac{\mathfrak{K}\cos(r, \mathfrak{K}_1)}{r^2} \quad \ldots\ldots \quad 12)$$

Dies ist also der Ausdruck für das Potential, das ein Magnet in einem von ihm weit entfernten Punkte P_2 erzeugt.

2f) Polstärke und Polabstand.[1]) Die Gleichung (12) ergibt das Potential eines Magnets nur für sehr ferne Punkte genau. Rückt P_2 näher an den Magnet AB heran (Fig. 2), für den wir eine gestreckte Stabform voraussetzen, so muß das Potential nach der allgemeinen Formel (5), S. 560 berechnet

[1]) E. Riecke, Wied. Ann. Bd. 8. (1879) S. 299.

werden. Man denkt sich zu dem Zwecke die ganze Stablänge 2 l in eine große Zahl sehr kleiner Teilstücke $\triangle$ eingeteilt. Es wird dann z. B. das Stückchen, dessen

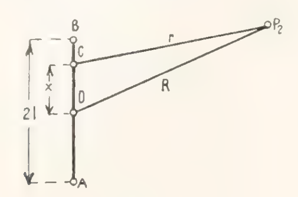


Fig. 2.

Mittelpunkt der im Abstand x von der Stabmitte gelegene Punkt C des Magnets ist, nach Gleichung (5) den Beitrag

$$\frac{k\triangle}{r}$$

zu dem Potential in P_2 liefern; darin ist $k\triangle$ die in $\triangle$ enthaltene magnetische Menge (k = Menge in der Längeneinheit). Das Potential selbst ist die Summe all dieser Beiträge

$$\psi = \sum_{x=-l}^{x=+l} \frac{k\triangle}{r}$$

Es läßt sich, unter der Voraussetzung, daß der Abstand R des Punktes P_2 von der Stabmitte größer ist als die halbe Stablänge l, und daß die magnetischen Mengen symmetrisch zur Stabmitte verteilt sind [k (x) = — k (— x)], durch die folgende konvergente Reihe darstellen:[1])

$$\psi = \frac{\mathfrak{K}_1 P_1(u)}{R^2} + \frac{\mathfrak{K}_3 P_3(u)}{R^4} + \frac{\mathfrak{K}_5 P_5(u)}{R^6} + \ldots 13)$$

Darin bedeutet u den Cosinus des Winkels ϑ; $u = \cos\vartheta$.

Hiermit bilden sich die Ausdrücke P(u) in folgender Weise:

$$P_1(u) = u$$

$$P_3(u) = \frac{1}{2}(5u^3 - 3u)$$

$$P_5(u) = \frac{1}{8}(63u^5 - 70u^3 + 15u)$$

$$P_n(u) = \frac{1.3.5\ldots(2n-1)}{1.2.3\ldots n}\left[u^n - \frac{n(n-1)}{2(2n-1)}u^{n-2} + \frac{n(n-1)(n-2)(n-3)}{2.4.(2n-1)(2n-3)}u^{n-4} - \ldots\right]$$

Die Kugelfunktionen[2]) $P_n(u)$ sind echte Brüche für die hier allein in Frage kommenden Werte von u unter 1; mit u = 1 nehmen sie sämtlich den Wert 1 an: $P_n(1) = 1$.

[1]) Die ausführliche Herleitung findet sich z. B. bei Cohn, Das elektromagnetische Feld, S. 181.

[2]) Wegen der Theorie dieser Funktionen siehe Heine, Kugelfunktionen, Berlin 1878 bis 1881; eine Zusammenstellung aller wichtigeren Formeln, sowie Zahlentafeln und Kurvendarstellungen geben Jahnke und Emde in ihren Funktionentafeln, Leipzig 1909.

Ferner ist

$$\mathfrak{K}_1 = \Sigma kx\triangle;\ \mathfrak{K}_3 = \Sigma kx^3\triangle;\ \text{usw.}$$
$$\mathfrak{K}_n = \Sigma kx^n\triangle$$

$\mathfrak{K}_1$ ist also nichts anderes als das magnetische Moment des Magnetstabes (man braucht nur in dem Ausdruck (11) den Stabmittelpunkt als Bezugspunkt zu nehmen); in entsprechender Weise könnte man $\mathfrak{K}_3$ als magnetisches Moment dritter Ordnung, $\mathfrak{K}_5$ als magnetisches Moment fünfter Ordnung, und so weiter bezeichnen. Es kommen hier nur Momente von ungerader Ordnung vor, weil wir symmetrische Verteilung der magnetischen Mengen auf dem Stabe angenommen hatten.

Der exakte Ausdruck (13) des Potentiales gestattet uns nun eine schärfere Fassung des Polbegriffes, als dies in Abschnitt 2 a möglich gewesen ist. Wir denken uns den bisher betrachteten Magnet ersetzt durch ein Polpaar, bestehend aus zwei einzelnen punktförmigen magnetischen Mengen $\pm$m vom Abstande 2 s. Die beiden Größen m und s wollen wir so bestimmen, daß das Feld unseres Magnets mit dem des Polpaars möglichst genau übereinstimmt, und werden dann m als die (äquivalente) Polstärke, s als den (äquivalenten) Polabstand des Magnets bezeichnen dürfen.

Die magnetischen Momente des Ersatzpolpaares ergeben sich sehr einfach zu

$$\left.\begin{array}{l}\overline{\mathfrak{K}}_1 = 2ms;\ \overline{\mathfrak{K}}_3 = 2ms^3;\ \ldots\\ \overline{\mathfrak{K}}_n = 2ms^n\end{array}\right\} \ldots 13a)$$

Das Feld des Polpaares würde mit dem Felde des betrachteten Magnets vollkommen übereinstimmen, wenn sämtliche Momente $\overline{\mathfrak{K}}_1, \overline{\mathfrak{K}}_3, \ldots$ den entsprechenden Momenten des Magnets $\mathfrak{K}_1, \mathfrak{K}_3 \ldots$ gleich wären. Da nur zwei Größen, nämlich m und s, beliebig gewählt werden können, so läßt sich die genannte Bedingung nicht allgemein erfüllen. Alles was sich erreichen läßt, ist eine annähernde Uebereinstimmung der Felder in einem nicht allzu geringen Abstande von dem Magnet oder von seinem Ersatzpolpaar; man bestimmt hierzu m und s aus dem Ansatze:

$$\overline{\mathfrak{K}}_1 = \mathfrak{K}_1;\ \overline{\mathfrak{K}}_3 = \mathfrak{K}_3.$$

Magnet und Polpaar sollen also gleiches magnetisches Moment erster und auch gleiches magnetisches Moment dritter Ordnung haben. Daraus ergibt sich

$$s = \sqrt{\frac{\mathfrak{K}_3}{\mathfrak{K}_1}};\ m = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mathfrak{K}_1^3}{\mathfrak{K}_3}}$$

Wir ziehen aus der vorstehenden Betrachtung das wichtige Ergebnis, daß die Begriffe „Polstärke“ und „Polabstand“ selbst für einen symmetrisch magnetisierten dünnen Stabmagnet nur zu einer angenäherten Beschreibung des Feldes taugen; für

Magnete von beliebiger Form und Magnetisierung schweben sie vollkommen in der Luft.

Für ein gleichförmig magnetisiertes Ellipsoid, dessen magnetische Achse mit der Hauptachse a zusammenfällt, kann nach Riecke der „Polabstand" s ähnlich wie beim Stabmagnet und in entsprechender Näherung definiert werden. Jedoch hängt beim ungleichachsigen Ellipsoid s auch von dem Punkt P ab, in dem das Feld bestimmt werden soll. Wir geben im folgenden s nur für die beiden „Hauptlagen" von P; die erste Hauptlage von P ist die Verlängerung der magnetischen Achse a, die zweite Hauptlage die auf a im Mittelpunkt des Magnets errichtete Normalebene.

Gleichung des Ellipsoids	s^2
$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$	I. Hauptlage $\frac{3}{5}\left(a^2 - \frac{b^2+c^2}{2}\right)$ II. „ $\frac{3}{5}\left(a^2 - \frac{4b^2-c^2}{3}\right)$
$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2+z^2}{b^2} = 1$ (Rotationsellipsoid)	$\frac{3}{5}(a^2-b^2)$
desgl., $b=a$ (Kugel)	0
desgl., $b=0{,}509a$	$(^2/_3\,a)^2$
desgl., $b=0$	$(0{,}77\,a)^2$
desgl., $b>a$	s wird imaginär

Der hiernach sich ergebende Polabstand null für die homogen magnetisierte Kugel bedeutet natürlich nicht, daß diese keine magnetischen Wirkungen nach außen ausübt, sondern besagt nur, daß der Polbegriff hier versagt. Dasselbe gilt bezüglich des imaginären Polabstandes des abgeplatteten Rotationsellipsoides.

2g) Die Magnetisierung. In der bisherigen Darstellung erschien das Feld eines Magnets bestimmt durch die Verteilung der magnetischen Mengen im Innern und auf der Oberfläche des Magnets. Diese Verteilung ist nach Gleichung (3) der Bedingung unterworfen, daß die Gesamtmenge von Magnetismus in jedem Magnete null ist. Handelt es sich speziell um einen langen dünnen und gleichförmig magnetisierten Stabmagnet, so wissen wir, daß er sich so verhält, als ob magnetische Mengen nur in seinen beiden Enden (den Polen) säßen. Bricht man ihn jedoch an irgendeiner Stelle entzwei, so zeigt sich, daß nun jedes Bruchstück wieder zwei Pole besitzt und der Fundamentalgleichung (3) genügt. Man ist also zu der Annahme genötigt, daß die auf der Bruchstelle zum Vorschein gekommenen magnetischen Mengen auch schon vorher dort vorhanden waren, und daß sie nur deshalb nicht nach außen zur Wirkung gekommen sind, weil sie sich vor dem Bruche gegenseitig neutralisiert haben. Da es nun bei dem Versuche auf die besondere Lage der Bruchstelle gar nicht ankommt, so muß dieselbe Annahme für das ganze Innere des Magnets gemacht werden. Man kommt so zu der Hypothese, daß überall im Innern des Magnets „magnetische Molekeln" — das sind Elementarpolpaare aus zwei punktförmigen Mengen $\pm$ m von dem sehr kleinen Abstand δ — verteilt seien. Man geht sogar noch weiter und denkt sich auch im Innern eines unmagnetischen Eisenstückes solche magnetische Molekeln verteilt. In dem unmagnetischen Eisen sollen die magnetischen Achsen der Molekeln nach allen Richtungen im Raume nach den Gesetzen des Zufalles verteilt sein, so daß also keine Achsenrichtung bevorzugt sein wird. Bildet man dann die geometrische Resultierende der magnetischen Momente sämtlicher Molekeln — das wäre also das magnetische Moment des Eisenstückes — so kommt null heraus: die magnetischen Momente der Molekeln heben sich im Mittel auf.

In einem Magnete dagegen sind die Molekeln in gewissem Sinne geordnet. Eine gewisse Richtung der magnetischen Achsen ist vor allen anderen bevorzugt, und im Grenzfalle weisen sämtliche magnetischen Achsen nach dieser Richtung. Ein solches „vollständig magnetisiertes" Eisenstück kann dann etwa durch das in Figur 3 wiedergegebene Schema veranschaulicht werden. Jedes Gebilde n—s soll eine Molekel darstellen; die Nordmenge + m entspreche der hellen, die Südmenge — m der schwarzen Fläche. Man sieht, wie nach außen nur die Nordmengen n_1 und die Südmengen s_8 zur Wirkung kommen; die Fernewirkung jeder Nordmenge n_2 wird durch die entgegengesetzte Fernewirkung der unmittelbar daneben liegenden Südmenge s_1 aufgehoben; entsprechendes gilt von den übrigen Mengen.

Der hier dargestellte Grenzfall, daß sämtliche Molekeln gleichgerichtet sind, wird nun für gewöhnlich bei Magneten nicht erreicht; vielmehr liegt die Sache so, daß zwar eine Richtung der Achsen bevorzugt ist, daß daneben aber auch jede andere Richtung vorkommt. Immer jedoch wird es möglich sein, den Magnet aufzufassen als ein Stück unmagnetisches Eisen, in das ein solches vollkommenes magnetisches Gitter eingelagert ist, wie wir es durch Figur 3 veranschaulicht haben. Man braucht hierzu nur soviel Molekeln mit der bevorzugten Achsenrichtung auszusondern, bis diese Richtung in

dem übrigbleibenden Molekelschwarme nicht mehr bevorzugt ist; der Schwarm stellt dann das unmagnetische Eisen dar, während die ausgesonderten Molekeln das Gitter nach Abbildung 3 bilden. Dieses Gitter wird um so

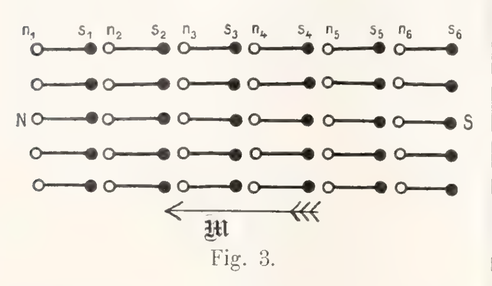


Fig. 3.

dichter sein, je größer die Zahl der Molekeln mit bevorzugter Achsenrichtung ist. Figur 4 zeigt als Beispiel das Gitter für einen Stab, in dessen linker Hälfte doppelt soviel Molekeln mit bevorzugter Richtung vorhanden sind, wie rechts. Dieser „ungleichförmig magnetisierte Stab" verhält sich demnach so, als ob am Nordende eine Menge

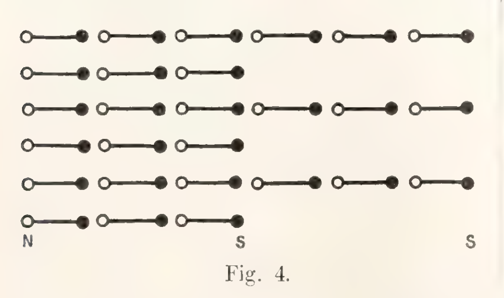


Fig. 4.

$+$ M, in der Mitte und am Südende je eine Menge — ½ M säße; denn in der Mitte wird nur die Hälfte der elementaren Südpole neutralisiert. Bei einem irgendwie ungleichförmig magnetisierten Stabe kann die Dichte des äquivalenten Molekelgitters von Querschnitt zu Querschnitt wechseln; es liegt dann das vor, was wir bisher als räumliche Verteilung von magnetischen Mengen im Innern eines Magnets bezeichnet haben. In den Beispielen der Figuren 3 und 4 dagegen sind die Mengen flächenhaft verteilt; in Figur 3 nur auf den Endflächen, in Figur 4 außerdem noch in dem Mittelquerschnitt.

Der Vorgang des Magnetisierens eines unmagnetischen Stahlstücks (etwa durch Streichen) besteht hiernach darin, daß die magnetischen Molekeln zum größeren oder geringeren Teile „gerichtet" werden; über den Widerstand, den die Molekeln dem entgegensetzen, wird in Abschnitt 4a und 4b gesprochen werden (S. 570 und 571).

Diese neue und so anschauliche Darstellung der magnetischen Verteilung ist auch einer einfachen mathematischen Formulierung fähig. Innerhalb eines Raumteiles, in dem die Dichte des Molekelgitters sich nicht ändert, ist der magnetische Zustand offenbar überall derselbe und nur durch die Dichte des Gitters bestimmt. Ein Maß für diese Dichte ist das auf die Raumeinheit bezogene resultierende magnetische Moment sämtlicher Molekeln des Gitters in dem betrachteten Raumteile. Diese Größe ist nach ihrer Definition eine gerichtete oder Vektorgröße; sie soll die Stärke der Magnetisierung oder kurz „die Magnetisierung" heißen und mit dem Buchstaben $\mathfrak{M}$ bezeichnet werden. Ist $d\tau$ ein Raumteilchen, $\mathfrak{M}$ die darin herrschende Magnetisierung, so ergibt sich sofort das magnetische Moment des ganzen Magnetstabes zu

$$\mathfrak{K} = \Sigma\, \mathfrak{M}\, d\tau \quad \ldots\ldots \quad 14)$$

Die Summation ist über sämtliche Raumteile $d\tau$ des Magnets auszudehnen.

Wir haben ferner gesehen, daß überall dort, wo sich die Dichte des Molekelgitters ändert, sich die magnetischen Mengen der Molekeln im Innern des Gitters nicht vollkommen neutralisieren, sondern daß vielmehr eine Gesamtmenge von nach außen wirksamem Magnetismus übrig bleibt, die der Aenderung der Dichte proportional ist. Daraus ergibt sich durch eine einfache geometrische Betrachtung der Satz:

Die in einem Raumteilchen $d\tau$ enthaltene magnetische Gesamtmenge (Ueberschuß des Nordmagnetismus über den Südmagnetismus) ist gleich dem gesamten durch die Oberfläche in das Innere von $d\tau$ eintretenden Fluß der Magnetisierung (Ueberschuß der eintretenden über die austretenden Magnetisierungslinien). Derselbe Satz gilt auch für einen beliebig großen endlichen Teil τ des Magnets.

Ist dS ein Oberflächenelement, N die auf dS errichtete und in den Außenraum weisende Normale, $\mathfrak{M}_N$ die Komponente der Magnetisierung in Richtung von N, so lautet die mathematische Formulierung des ausgesprochenen Satzes:

$$-\Sigma\, \mathfrak{M}_N\, dS = \Sigma\, m = \Sigma(\varrho\, d\tau + \sigma\, ds) \,.\,. \quad 15)$$

Die Summe links enthält sämtliche Teile der Oberfläche des Raumes τ; die Summe in der Mitte sämtliche Mengen m innerhalb τ (mit Rücksicht auf das Vorzeichen); in der Summe rechts sind die Mengen in räumlich und flächenhaft verteilte geschieden, denn es ist ja möglich, daß τ von Flächen s durchschnitten wird, auf denen Mengen mit der Flächendichte σ verteilt sind.

In derselben Weise, in der wir früher das magnetische Feld $\mathfrak{H}$ durch Feldlinien veranschaulicht haben, läßt sich auch die Verteilung der Magnetisierung durch ein System von $\mathfrak{M}$-Linien darstellen. Hier ist

nun von Bedeutung, daß jedes System solcher Linien einen möglichen Magnet ergibt; dort, wo die $\mathfrak{M}$-Linien endigen, sitzen auf Grund des in der Gleichung (15) formulierten Satzes die magnetischen Mengen. Die $\mathfrak{M}$-Linien entspringen auf den Südmengen und münden auf den Nordmengen ein. Wenn man die $\mathfrak{M}$-Linien überall in solcher Dichte zeichnet, daß diese Dichte zugleich dem Betrag von $\mathfrak{M}$ an der betreffenden Stelle gleich ist, so folgt aus Gleichung (15), daß dem Anfangspunkte jeder $\mathfrak{M}$-Linie die Südmenge 1, dem Endpunkte die Nordmenge 1 entspricht. Da aber jede anfangende $\mathfrak{M}$-Linie auch irgendwo endigen muß, so sehen wir, daß die Grundgleichung (3) ($\Sigma m = 0$) auch bei beliebiger Verteilung der $\mathfrak{M}$-Linien von selbst erfüllt ist. Anderseits ist die Verteilung der Mengen durch die Verteilung der $\mathfrak{M}$-Linien vollkommen bestimmt.

Das Umgekehrte gilt aber nicht: Bei gegebener Verteilung der Mengen (auch wenn sie der Gleichung (3) genügt) ist die Verteilung der Magnetisierung noch nicht bestimmt. Denn man kann jeder Verteilung von $\mathfrak{M}$-Linien, welche die gewünschte Verteilung der magnetischen Mengen liefert, ein System geschlossener (d. h. in sich zurücklaufender) $\mathfrak{M}$-Linien überlagern, ohne daß sich an der Verteilung der Mengen das mindeste ändert. Ein Beispiel dafür ist ein gleichförmig magnetisierter geschlossener Stahlring; die $\mathfrak{M}$-Linien laufen in konzentrischen Kreisen sämtlich in sich selbst zurück; sie besitzen nirgends Enden. Daher gibt es nirgends in dem Ringe magnetische Mengen (der Ring hat keine Pole); dennoch ist sein magnetischer Zustand von dem eines unmagnetisierten Ringes durchaus verschieden. Die Magnetisierung $\mathfrak{M}$ eignet sich daher besser zur Beschreibung der Eigenschaften von Magneten als die Angabe der Verteilung der Mengen.

Außerhalb der Magnete ist natürlich $\mathfrak{M}$ überall null.

Auf die Berechnung des Potentiales und des Feldes aus der Verteilung der Magnetisierung kann in einer elementaren Darstellung, wie es die vorliegende sein soll, nicht eingegangen werden; es sei bezüglich dieses Punktes auf die Lehrbücher verwiesen.[1]) Dagegen soll noch der Ausdruck zur Berechnung der Feldenergie angegeben werden. Durch Einführung der Magnetisierung in Gleichung (7) erhält man

$$W_m = -\frac{1}{2} \Sigma \mathfrak{H} \mathfrak{M} \cos \alpha \, d\tau \quad . \; . \; . \quad 16)$$

$\mathfrak{H}$ ist die magnetische Feldstärke, $\mathfrak{M}$ die Magnetisierung in dem Raumteilchen $d\tau$, α der Winkel zwischen $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{M}$; die Addition soll auf den ganzen Raum ausgedehnt werden, in welchem $\mathfrak{H}\mathfrak{M} \cos \alpha$ nicht null ist, das heißt auf das Innere der Magnete.

Die wechselseitige Energie zwischen zwei Magneten 1 und 2 wird

$$\begin{aligned} R &= -\Sigma \mathfrak{M}_1 \mathfrak{H}_2 \cos(\mathfrak{M}_1, \mathfrak{H}_2) \, d\tau_1 \\ &= -\Sigma \mathfrak{M}_2 \mathfrak{H}_1 \cos(\mathfrak{M}_2, \mathfrak{H}_1) \, d\tau_2 \quad . \; . \quad 17) \end{aligned}$$

3. Der Einfluß der Materie in der elementaren Theorie. 3a) Die Permeabilität. Wir haben im vorhergehenden auf die besonderen Eigenschaften der Materie gar keine Rücksicht genommen und unsere Betrachtungen so durchgeführt, als ob die magnetischen Mengen im Vakuum eingebettet wären.

Wenn wir uns nun zunächst das Vakuum mit irgendeinem homogenen Stoffe erfüllt denken, so bleibt das Coulombsche Gesetz formal bestehen; die Größe der Kräfte f ändert sich aber:

$$f = \frac{m_1 m_2}{\mu r^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1c)$$

μ heißt die „Permeabilität" des Stoffes; für die meisten Körper unterscheidet sie sich nicht wesentlich von dem Werte $\mu = 1$ des Vakuums. Nur Eisen und eine Anzahl Legierungen weisen eine Permeabilität auf, die vielmals größer als 1 ist.

Unter Zugrundelegung von Gleichung (1c) wird die von der Menge m_1 erzeugte Feldstärke

$$\mathfrak{H} = \frac{m_1}{\mu r^2} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 1d)$$

An Stelle von Gleichung (4), S. 560 tritt

$$\Sigma \mu \mathfrak{H}_N \, dS = 4\pi \Sigma \varrho \, d\tau \quad . \; . \; . \; . \quad A)$$

Die Bedeutung der Zeichen ist dieselbe wie früher. Das magnetische Potential ist

$$\psi = \Sigma \frac{m}{\mu r} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 5a)$$

und daraus erhält man, wie früher,

$$\mathfrak{H} = -\operatorname{grad} \psi \quad . \; . \; . \; . \; . \quad C_1)$$

Die Ausdrücke (7) und (10) für die Energie bleiben bestehen; dagegen geht (7a), S. 561 über in

$$W_m = \frac{1}{8\pi} \Sigma \mu \mathfrak{H}^2 d\tau \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad B)$$

An dem Zusammenhange zwischen der Magnetisierung und den magnetischen Mengen wird nichts geändert, da dieser Zusammenhang nach der Definition der Magnetisierung ein rein geometrischer ist.

Eine ebenfalls rein geometrische Ueberlegung ergibt aus Gleichung (C_1), daß sich durch das Herumführen eines magnetischen Einheitspoles in dem von magnetischen Mengen erzeugten Felde $\mathfrak{H}$ keine Arbeit gewinnen läßt, falls man dabei einen geschlossenen (zum Ausgangspunkte zurückführenden) Weg l beschreibt. Ist dl ein kleines

[1]) Z. B. Cohn, Das elektromagn. Feld, S. 188, Gl. 12a, 12, 13, 14; Abraham, Theorie der Elektrizität I, S. 234 ff.

Stück dieses Weges, $\mathfrak{H}_l$ die in Wegrichtung fallende Feldkomponente, so lautet der soeben ausgesprochene Satz

$$\Sigma \mathfrak{H}_l dl = 0 \quad \ldots \ldots \quad C_1)$$

Die Erfahrung lehrt, daß die Gleichungen A, B, C, C_1 auch dann noch gelten, wenn die vorausgesetzte Homogenität des den Raum erfüllenden Stoffes nicht mehr zutrifft, also auch die Permeabilität μ sich räumlich ändert. Dagegen versagt in diesem allgemeinen Falle das Coulombsche Gesetz (1c) und die daran geknüpfte Berechnung der Feldstärke (1d) und des Potentials (5a).

3b) Die induzierte Magnetisierung. Das Coulombsche Gesetz und die daraus fließenden Folgerungen lassen sich auch in Feldern mit räumlich veränderlicher Permeabilität wenigstens formal aufrecht erhalten, wenn man folgende Betrachtungen durchführt.

Man denke sich die gegebene Verteilung der magnetischen Mengen m, bezw. der Magnetisierung $\mathfrak{M}$, deren Feld $\mathfrak{H}$ bestimmt werden soll, in einem Raume mit konstanter Permeabilität ($\mu = \mu_0 = 1$) vorhanden. Dann kann man nach Früherem (Gleichung 5 und 5a) das Potential ψ_0 und das Feld $\mathfrak{H}_0$ (Gleichung 6) berechnen.

Infolge der Anwesenheit der Materie entsteht ein Zusatzfeld $\mathfrak{Z}$, das sich aus einem Zusatzpotential χ ableitet

$$\mathfrak{Z} = -\operatorname{grad} \chi \quad \ldots \ldots \quad 18)$$

Das wirkliche Potential ist also

$$\psi = \psi_0 + \chi \quad \ldots \ldots \quad 19)$$

und das wirkliche Feld somit

$$\mathfrak{H} = -\operatorname{grad} \psi \quad \ldots \ldots \quad 20)$$

Das Zusatzpotential rührt her von den sogenannten „induzierten" magnetischen Mengen m′ oder von der „induzierten Magnetisierung" $\mathfrak{J}$. Diese tritt überall dort auf, wo die Permeabilität μ von der des Vakuums ($\mu = \mu_0 = 1$) abweicht und ist der Feldstärke $\mathfrak{H}$ proportional:

$$\mathfrak{J} = \varkappa \mathfrak{H} = \frac{\mu - 1}{4\pi} \mathfrak{H} \quad \ldots \ldots \quad 21)$$

$\varkappa$ heißt die magnetische „Suszeptibilität"; der Faktor $\frac{1}{4\pi}$ ist durch die Wahl des Maßsystems bedingt (das absolute elektromagnetische CGS-System).

Die Verteilung der induzierten magnetischen Mengen m′ ergibt sich aus der Verteilung der induzierten Magnetisierung $\mathfrak{J}$ genau ebenso, wie die Verteilung der „wahren Mengen" m aus der Verteilung der „wahren Magnetisierung" $\mathfrak{M}$ (siehe 2g). Somit kommen auch die induzierten Mengen immer nur paarweise vor, jede $\mathfrak{J}$-Linie entspringt auf einer induzierten Südmenge und mündet auf einer induzierten Nordmenge vom Betrag 1.

Die Berechnung des Zusatzpotentiales aus den induzierten Mengen (oder aus der induzierten Magnetisierung) geschieht nach denselben Formeln, wie die Berechnung des Potentiales ψ_0 im homogenen Raume aus den wahren Mengen.

Aus Gleichung (21) folgt noch

$$\mu \mathfrak{H} = \mathfrak{H} + 4\pi \mathfrak{J} \quad \ldots \ldots \quad 21a)$$

Dieser Gleichung läßt sich der folgende Sinn unterlegen, der sich bei der Betrachtung der besonderen Eigenschaften des Eisens auch als physikalisch bedeutungsvoll erweisen wird. $\mu \mathfrak{H}$, die „magnetische Polarisation" genannt, setzt sich aus zwei Teilen zusammen; der erste ($\mathfrak{H}$) charakterisiert den magnetischen Zustand des leeren Raumes; der zweite ($4\pi\mathfrak{J}$) ist durch die Anwesenheit der Materie und deren besondere Eigenschaften bedingt.

Die induzierten Mengen m′ haben die weitere Bedeutung, daß sie bei der Berechnung der Kräfte f aus dem Coulombschen Gesetze (Gleichung 1) ebenso berücksichtigt werden müssen, wie die wahren Mengen m. Für das Coulombsche Gesetz kommt also die Summe m + m′ der in jedem Raumelement vorhandenen wahren und induzierten Menge in Betracht; für diese Summe hat sich die Bezeichnung „freie" magnetische Menge eingebürgert.

3c) Ellipsoid im gleichförmigen Felde; entmagnetisierender Faktor. Die in dem Vorhergehenden gegebene Darstellung des Feldes eignet sich nicht zur wirklichen Berechnung des Feldes bei gegebener Verteilung der Magnetisierung $\mathfrak{M}$ und gegebener Anordnung der Materie. Das liegt daran, daß die zur Berechnung des Zusatzpotentiales χ erforderliche induzierte Magnetisierung $\mathfrak{J}$ nach (Gleichung 21) ihrerseits von dem Felde $\mathfrak{H}$ abhängt, das erst noch berechnet werden soll. Das hierin liegende mathematische Problem ist bisher nur für wenige spezielle Fälle streng gelöst worden. Einer der interessantesten ist der des in ein gleichförmiges Feld $\mathfrak{H}_0$ gebrachten homogenen Ellipsoids von der Permeabilität μ.

Wird das Koordinatensystem so gewählt, daß die Achsen x, y, z in die Richtung der Achsen a, b, c des Ellipsoids fallen, und bedeuten $\mathfrak{H}_{0x}$, $\mathfrak{H}_{0y}$, $\mathfrak{H}_{0z}$ die in diese Richtungen fallenden Komponenten des gleichförmigen Feldes, so ergeben sich die folgenden Komponenten der induzierten Magnetisierung:

$$4\pi\mathfrak{J}_x = \frac{\mathfrak{H}_{0x}}{\frac{1}{\mu-1} + A}; \quad 4\pi\mathfrak{J}_y = \frac{\mathfrak{H}_{0y}}{\frac{1}{\mu-1} + B};$$

$$4\pi\mathfrak{J}_z = \frac{\mathfrak{H}_{0z}}{\frac{1}{\mu-1} + C} \quad \ldots \ldots \quad 22)$$

Darin sind A, B, C Konstanten, die nur

von den Achsenverhältnissen des Ellipsoids abhängen.

Auf der rechten Seite der Ausdrücke (22) stehen nur konstante Größen; die Magnetisierung $\mathfrak{J}$ ist daher gleichförmig innerhalb des ganzen Ellipsoids. Dagegen fällt sie im allgemeinen nicht mit der Richtung des ursprünglichen Feldes $\mathfrak{H}_0$ zusammen; denn die Proportionalitätsfaktoren der drei Komponenten (die drei Nenner in Gleichung 22) sind im allgemeinen verschieden. Fällt jedoch das ursprüngliche Feld $\mathfrak{H}_0$ in die Richtung einer der Hauptachsen, z. B. von a, so fällt auch $\mathfrak{J}$ in dieselbe Richtung. Es wird dann

$$4\pi\mathfrak{J} = \frac{\mathfrak{H}_0}{\frac{1}{\mu-1}+A} \quad . \; . \; . \; . \quad 22a)$$

Hieraus und aus (21a) folgt

$$\mathfrak{H} = \frac{\mathfrak{H}_0}{1+(\mu-1)A} = \mathfrak{H}_0 - N\mathfrak{J} \quad . \; . \quad 23)$$

mit

$$N = 4\pi A \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 23a)$$

Der Sinn von Gleichung (23) ist der:

Dort, wo die $\mathfrak{J}$-Linien endigen, nämlich auf der Oberfläche des Ellipsoids, sitzen die induzierten magnetischen Flächenladungen. Diese erzeugen im Innern des Ellipsoids ein homogenes Zusatzfeld, das natürlich der Magnetisierung proportional ist, und das dem Felde $\mathfrak{H}_0$ entgegenwirkt. Das resultierende (gleichfalls homogene) Feld[1]) $\mathfrak{H}$ ist daher kleiner als das ursprüngliche Feld. Der Faktor N wird darum der „entmagnetisierende Faktor" des Ellipsoids genannt.

Zur Berechnung von N dient die Formel:

$$A = \frac{1}{2}\int_0^\infty \frac{dt}{(1+t)\sqrt{(1+t)\left(1+\frac{a^2}{b^2}t\right)\left(1+\frac{a^2}{c^2}t\right)}}$$

Der Ausdruck rechts ist, wenn die Achsen a, b, c ungleich sind, ein elliptisches Integral.

Ist a verschwindend klein, so artet das Ellipsoid in eine (senkrecht zu ihrer Ebene magnetisierte) Scheibe aus; dann ist $A = 1$; $N = 4\pi$ (Maximalwert). Sind umgekehrt b und c verschwindend klein gegen a, das heißt hat das Ellipsoid die Form eines langen dünnen Stabes, so wird $A = N = 0$ (Minimalwert).

Für ein verlängertes Rotationsellipsoid ($b = c = a\sqrt{1-e^2}$) vereinfacht sich die Formel für A zu

$$A = \frac{1-e^2}{e^2}\left(\frac{1}{2e}\log\text{nat}\frac{1+e}{1-e} - 1\right).$$

Für eine Kugel (e = o) wird

$$A = 1/3.$$

Die folgende Zusammenstellung enthält die Werte von N für verschiedene Werte des Achsenverhältnisses a/b des Rotationsellipsoids. Daneben sind die für axial magnetisierte Kreiszylinder von du Bois bestimmten Entmagnetisierungsfaktoren angegeben. Hier ist dieser Begriff freilich etwas unbestimmt, da ein Kreiszylinder in einem homogenen mit seiner Achse gleichgerichteten Felde $\mathfrak{H}_0$ keine streng homogene Magnetisierung $\mathfrak{J}$ annimmt und damit auch das resultierende Feld $\mathfrak{H}$ im Innern des Zylinders nicht homogen bleibt; man hilft sich so, daß man für $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{J}$ in (23) die Mittelwerte des mittleren Querschnitts nimmt. Der Begriff des Entmagnetisierungsfaktors ist also hier nur ein Notbehelf; für Körper beliebiger Gestalt ist er überhaupt nicht zu gebrauchen.

a/b	N für das Rotationsellipsoid	N für den Zylinder
0	12,5664	12,5664
0,5	6,5864	—
1	4,1888	—
5	0,7015	—
10	0,2549	0,2160
15	0,1350	0,1206
20	0,0848	0,0775
25	0,0579	0,0533
30	0,0432	0,0393
40	0,0266	0,0238
50	0,0181	0,0162
60	0,0132	0,0118
70	0,0101	0,0089
80	0,0080	0,0069
100	0,0054	0,0045
150	0,0026	0,0020
200	0,0016	0,0011
300	0,00075	0,00050
400	0,00045	0,00028
500	0,00030	0,00018
1000	0,00008	0,00005
∞	0	0

3d) Die Permeabilität der Magnete. Wir haben bisher die Magnete als Körper angesehen, die sich von ihrer Umgebung nur dadurch unterscheiden, daß in ihnen eine an die Körperelemente gebundene „permanente" Magnetisierung $\mathfrak{M}$ auftritt. In Wirklichkeit wird diese Eigenschaft nur bei gewissen Eisensorten beobachtet, die zugleich eine höhere Permeabilität μ besitzen, ohne daß freilich ein unmittelbarer Zusammenhang zwischen dem Wert μ und der Fähigkeit, permanente Magnetisierung anzunehmen, nachweisbar wäre. Befindet sich der Magnet in einem Mittel, dessen Permeabilität μ_2 von der des Magnets μ_1 verschieden ist, so nimmt auch der Magnet selbst in seinem eigenen Felde eine induzierte Magnetisierung $\mathfrak{J}$ an, die sich mit seiner permanenten oder wahren Magnetisierung $\mathfrak{M}$ zu der nach außen wirksamen freien Magnetisierung $\mathfrak{M}+\mathfrak{J}$ zusammensetzt. Bei der Berechnung von $\mathfrak{J}$ ergibt sich hier wieder die Schwierigkeit, daß $\mathfrak{J}$ von dem erst zu bestimmenden wahren Felde $\mathfrak{H}$ abhängt. Daraus folgt:

1. Der Magnet ($\mu=\mu_1$) befinde sich allein

---

[1]) Hier möge der Hinweis Platz greifen, daß das resultierende Feld außerhalb des Ellipsoids nicht homogen bleibt.

in einem homogenen Mittel von der Permeabilität $\mu = \mu_2$ und erzeuge das Feld $\mathfrak{H}_2$; wird nun der Magnet in ein anderes wiederum homogenes Mittel von der Permeabilität $\mu = \mu_3$ gebracht, so wird das nunmehr entstehende Feld $\mathfrak{H}_3$ im allgemeinen dem Felde $\mathfrak{H}_2$ nicht einmal geometrisch ähnlich sein (die Kraftlinien verlaufen anders).

2. Gehört zu einem bestimmten Magnet das Feld $\mathfrak{H}_1$, zu einem zweiten Magnet das Feld $\mathfrak{H}_2$, so ist das Feld, wenn beide Magnete zugleich vorhanden sind, im allgemeinen nicht $\mathfrak{H}_1 + \mathfrak{H}_2$. Die Felder von Magneten superponieren sich nicht, und dies ist der grundsätzliche Fehler der unter Nr. 2 gegebenen Darstellung (Gleichung 9). Diese ist jedoch dort praktisch brauchbar, wo der Einfluß der induzierten Magnetisierung gering ist (Ablenkung langer dünner Magnetnadeln im homogenen Felde u. dgl.).

Ein Beispiel, in dem die Verhältnisse genau überblickt werden können, ist das eines gleichförmig magnetisierten Ellipsoids. Wäre μ überall 1, so hätte das Potential den Wert

$$\psi_0 = -\mathfrak{M} \operatorname{grad} p$$

wo $p = \int d\tau / r$ das Newtonsche Potential des Ellipsoids bedeutet[1]). Ist dagegen μ für den Magnet $= \mu_1$, für den Außenraum $= \mu_2$, so wird

$$\psi = -\mathfrak{M}' \operatorname{grad} p$$

Die scheinbare Magnetisierung $\mathfrak{M}'$ ist im allgemeinen der wahren nicht gleichgerichtet; sind a, b, c die Achsen des Ellipsoids, so wird

$$\mathfrak{M}'_a = \frac{\mathfrak{M}_a}{\mu_1 A + \mu_2 (1 - A)}\,; \quad \mathfrak{M}'_b = \frac{\mathfrak{M}_b}{\mu_1 B + \mu_2 (1 - B)}$$

$$\mathfrak{M}'_c = \frac{\mathfrak{M}_c}{\mu_1 C + \mu_2 (1 - C)}$$

A, B, C sind die im vorhergehenden (Nr. 3c) erwähnten Konstanten. Daher bleibt sich selbst in diesem speziellen Beispiel das Feld nicht geometrisch ähnlich, wenn man den Ellipsoidmagnet nacheinander in Medien von verschiedener Permeabilität bringt. Das ist nur dann der Fall, wenn die wahre Magnetisierung in eine der Hauptachsen des Ellipsoids fällt: $\mathfrak{M} = \mathfrak{M}_a$; $\mathfrak{M}_b = \mathfrak{M}_c = 0$. Dann — und nur dann — wird das Feld in konstantem Verhältnisse geändert. Befindet sich das Ellipsoid in Luft ($\mu = 1$), so kommt für die Wirkung nach außen eine scheinbare Magnetisierung

$$\mathfrak{M}' = \frac{\mathfrak{M}}{(\mu - 1) A + 1}$$

in Frage, nicht aber die wahre Magnetisierung $\mathfrak{M}$.

3e) Magnetische Induktion. In Abschnitt 2g hatte sich ergeben, daß auf jeder nordmagnetischen Einheitsmenge (m = 1) eine $\mathfrak{M}$-Linie einmündet, wenn man diese Linien in solcher Dichte zieht, daß ihre Zahl auf der Flächeneinheit den Betrag von $\mathfrak{M}$ mißt. Anderseits ergibt sich aus der Beziehung A in Abschnitt 3a S. 565 (vgl. Gleichung 4 unter 2b), daß auf jeder nordmagnetischen Einheitsmenge eine Anzahl von 4π-Linien der magnetischen Polarisation $\mu\mathfrak{H}$ entspringt.

Bilden wir nun aus der 4π-fachen wahren Magnetisierung $4\pi\mathfrak{M}$ und der Polarisation $\mu\mathfrak{H}$ den resultierenden Vektor

$$\mathfrak{B} = \mu\mathfrak{H} + 4\pi\mathfrak{M} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 24)$$

und nennen ihn die „magnetische Induktion", so folgt aus dem vorstehenden, daß die $\mathfrak{B}$-Linien nirgends entspringen oder münden, sondern sämtlich in geschlossenen Bahnen verlaufen müssen. Trifft nämlich ein Bündel von Induktionslinien z. B. auf eine nordmagnetische Menge, so verschwindet dort zwar eine dieser Menge entsprechende Zahl von Magnetisierungslinien, dafür aber entspringt daselbst die 4π-fache Zahl von Polarisationslinien; die Zahl der Induktionslinien des Bündels (die ja den Betrag von $\mathfrak{B}$ mißt) bleibt somit beim Durchgang durch die Menge ungeändert. Da außerhalb der Mengen aber schon die Linien von $\mathfrak{M}$ und $\mu\mathfrak{H}$ keine Quellpunkte und keine Endpunkte besitzen, so können auch die Linien von $\mathfrak{B} = \mu\mathfrak{H} + 4\pi\mathfrak{M}$ dort keine derartigen Punkte haben. Es gibt somit nirgends solche Punkte, und die Induktionslinien können nur in sich selbst zurücklaufen.

Die magnetische Induktion $\mathfrak{B}$ vermittelt nach dem Faradayschen Induktionsgesetze einen wichtigen Teil der Beziehungen zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Felde. Es ist nämlich die Abnahme, die der eine beliebige Fläche S durchsetzende Induktionsfluß in der Zeiteinheit erfährt, gleich der elektrischen Umlaufspannung um den Rand dieser Fläche. Blickt man in Richtung der Induktionslinien, so soll der Rand im Sinne des Uhrzeigers durchlaufen werden. Besteht z. B. der Rand aus einem Metalldraht, so entsteht in diesem ein „Induktionsstrom", und der rund herum berechnete Ohmsche Spannungsabfall dieses Stromes ist dann die Umlaufspannung.

Ist dS ein Flächenteilchen in S, $\mathfrak{B}_N$ die dieses Teilchen senkrecht durchsetzende Komponente von $\mathfrak{B}$, so ist

$$\Phi = \Sigma \mathfrak{B}_N dS$$

der Induktionsfluß durch die Fläche S. Ist ferner l die Randlinie von S, bedeutet dl ein als geradlinig anzusehendes sehr kleines Teilchen von l, und $\mathfrak{E}_l$ die in Richtung von dl fallende Komponente der elektrischen Feldstärke, so ist

$$E = \Sigma \mathfrak{E}_l dl$$

die elektrische Umlaufspannung um den Rand l. Somit lautet das Faradaysche Induktionsgesetz

[1]) Im Innern des Ellipsoids ist

$$\frac{p}{4\pi} = p_0 - \frac{1}{2}(Ax^2 + By^2 + Cz^2);\ p_0 \text{ eine Konstante.}$$

$$E = -\frac{d\Phi}{dt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad D)$$

wenn man unter $d\Phi$ die Zunahme versteht, die der Fluß Φ in der kleinen Zeit dt erfahren hat.

Wegen (21a S. 566) kann der Ausdruck (24) auch so geschrieben werden:

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi(\mathfrak{M} + \mathfrak{J}) \quad . \quad . \quad . \quad 25)$$

Hier erscheint die magnetische Induktion als Resultierende der Feldstärke und der 4π-fachen freien Magnetisierung $(\mathfrak{M} + \mathfrak{J})$.

3f) Der permanente Ringmagnet. Ein Ring sei in Richtung seiner Leitlinie

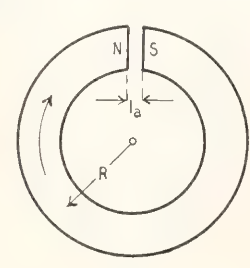


Fig. 5.

(Pfeilrichtung in der Figur 5) gleichförmig magnetisiert. Zur Vereinfachung der Betrachtung wird angenommen, daß die Querschnittsabmessungen klein im Vergleich zum Ringradius R sind. Ist der Ring zunächst vollkommen geschlossen, so laufen alle Magnetisierungslinien in sich zurück; es gibt nirgends wahre magnetische Mengen, und das Feld $\mathfrak{H}$ ist darum null:

$$\mathfrak{H} = 0;\ \mathfrak{J} = 0;\ \mathfrak{B} = 4\pi\mathfrak{M} \quad . \quad . \quad 26a)$$

Erzeugen wir künstlich ein magnetisches Feld $\mathfrak{H}_0$ in der Richtung der Magnetisierung, z. B. indem wir den Ring bewickeln und einen elektrischen Strom durch diese Wickelung schicken, so wird

$$\mathfrak{H} = \mathfrak{H}_0;\ \mathfrak{J} = \varkappa\mathfrak{H}_0;\ \mathfrak{B} = \mu\mathfrak{H}_0 + 4\pi\mathfrak{M} \quad . \quad 26b)$$

Nach der letzten Gleichung ist die sogenannte „Magnetisierungskurve" $\mathfrak{B} = f(\mathfrak{H})$ nach dieser elementaren Theorie eine Gerade (Fig. 6).

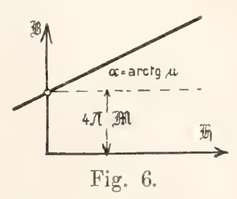


Fig. 6.

Wir denken uns nun den Ring an einer Stelle durch einen schmalen Schlitz von der Länge l_a unterbrochen (Fig. 5). Da in diesem Luftraum keine wahre Magnetisierung $\mathfrak{M}$ besteht, so müssen die im Eisen vorhandenen $\mathfrak{M}$-Linien nun auf der einen Endfläche S beginnen und auf der anderen Endfläche N münden. Auf S erscheint somit eine südmagnetische, auf N eine nordmagnetische Flächenbelegung von wahren magnetischen Mengen mit der Dichte $\sigma = \mathfrak{M}$. Nun erst kann der Magnet in die Ferne wirken. Wenn der Schlitz eng ist, tritt freilich ein merkliches Feld $\mathfrak{H}$ außer in dem Magnet selbst nur in dem Schlitz auf, wo die $\mathfrak{H}$-Linien senkrecht zwischen den Flächen N und S übergehen. Wir bezeichnen mit $\mathfrak{H}_a$ die Feldstärke, mit $\mathfrak{B}_a$ die Induktion im Schlitz, mit $\mathfrak{H}_i$ und $\mathfrak{B}_i$ die entsprechenden Größen im Magnet und nehmen die Pfeilrichtung als positive Richtung für alle Vektoren an. Außerdem sei $l_i = 2\pi R - l_a$ die mittlere Länge einer Kraftlinie im Magnet. Dann ist nach Gleichung (C) Abschnitt 3a S. 566

$$\mathfrak{H}_i l_i + \mathfrak{H}_a l_a = 0 \quad . \quad . \quad . \quad 26c)$$

Ferner, da sich sämtliche Induktionslinien des Eisenkerns im Luftschlitz wiederfinden müssen, $\mathfrak{B}_a = \mathfrak{B}_i$, oder wegen (24)

$$\mathfrak{H}_a = \mu_i\mathfrak{H}_i + 4\pi\mathfrak{M} \quad . \quad . \quad . \quad 26d)$$

Daraus folgt, wenn F den Ringquerschnitt und $\Phi = \mathfrak{B}F = \mathfrak{H}_a F$ den Induktionsfluß bezeichnet,

$$\Phi = \frac{\dfrac{4\pi\mathfrak{M}l_i}{\mu_i}}{\dfrac{l_a}{F} + \dfrac{l_i}{\mu_i F}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 26f)$$

Diese Gleichung ist dem Ohmschen Gesetze ähnlich gebaut und wird darum auch das „Ohmsche Gesetz für den magnetischen Kreis" genannt. Dem entsprechend heißt der Zähler von (26f) die „magnetomotorische Kraft", der Nenner der „magnetische Widerstand" des Kreises; er setzt sich (ebenso wie der elektrische Widerstand bei einem nicht homogenen Kreise) aus den Teilwiderständen $\frac{l_a}{F}$ und $\frac{l_i}{\mu_i F}$ zusammen.[1])

Kommt noch die Wirkung einer auf dem Ring befindlichen stromdurchflossenen Wicklung hinzu, so ist die magnetische Umlaufspannung (Gleichung C) nicht mehr null, sondern gleich dem 4π-fachen Stromfluß I (= der $0{,}4\pi$-fachen Amperedrahtzahl) durch die umlaufene Fläche. Daher tritt an Stelle von (26c) die Gleichung

$$\mathfrak{H}_i l_i + \mathfrak{H}_a l_a = 4\pi I \quad . \quad . \quad . \quad 26g)$$

und es folgt

[1]) Bei permanenten Ringmagneten hat sich die magnetomotorische Kraft und auch der innere magnetische Widerstand in weiten Grenzen als konstant erwiesen; vgl. R. H. Weber, Ann. Phys. Bd. 16 (1905), S. 178; E. Kempken, Ann. Phys., Bd. 20 (1906), S. 1017; P. Gehne, Ann. Phys., Bd. 28 (1909), S. 553.

$$\Phi = \frac{4\pi \frac{\mathfrak{M} l_i}{\mu_i} + 4\pi I}{\frac{l_a}{F} + \frac{l_i}{\mu_i F}} \quad . \; . \; . \quad 26h)$$

Man kann also den Sachverhalt durch die Aussage darstellen, daß zu der dem Magnet eigentümlichen oder „eingeprägten" magnetomotorischen Kraft noch eine vom elektrischen Stromfelde herrührende „äußere" magnetomotorische Kraft $4\pi I$ hinzukommt.

Aus (26d) und (26g) ergibt sich noch

$$\mathfrak{H}_i = \frac{4\pi(I - \mathfrak{M} l_a)}{l_i + \mu_i l_a},$$

wofür man auch schreiben kann

$$\mathfrak{H}_i = \mathfrak{H}_0 - \frac{4\pi l_a}{l_i + l_a}(\mathfrak{J} + \mathfrak{M}) \quad . \; . \quad 27)$$

Darin ist $\mathfrak{H}_0 = 4\pi I/(l_i + l_a)$ dasjenige Feld, welches der Stromfluß I in einem Ring erzeugen würde, der vollkommen aus Luft besteht. Folglich stellt

$$N = \frac{4\pi l_a}{l_i + l_a} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 27a)$$

den Entmagnetisierungsfaktor des geschlitzten Ringes dar; dieser Faktor bezieht sich, wie man sieht, auf die freie Magnetisierung $\mathfrak{J} + \mathfrak{M}$.

Der geschlitzte Ring bietet ein bequemes Mittel zur Erforschung der magnetischen Eigenschaften des Eisens. Die im Eisen vorhandene Induktion $\mathfrak{B}$ stimmt mit der Feldstärke $\mathfrak{H}_a$ in dem Luftschlitz überein, vorausgesetzt, daß dieser genügend eng ist; sie kann also unmittelbar gemessen werden (der Luftschlitz ist für unsere Meßvorrichtungen zugänglich). Ferner ist

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H}_i + 4\pi(\mathfrak{J} + \mathfrak{M}).$$

Gesucht ist die Beziehung zwischen der Feldstärke im Innern des Eisens $\mathfrak{H}_i$ und der freien Magnetisierung $(\mathfrak{J} + \mathfrak{M})$.

Eine zweite Gleichung zwischen diesen Größen liefert Gleichung (27); hiermit ist alles zur Bestimmung der Abhängigkeit der freien Magnetisierung von der Feldstärke gegeben. Wegen der Ausführung der Messung wird auf den Artikel „Magnetische Messungen" verwiesen.

4. Die Theorie mit Rücksicht auf die Eigenschaften der ferromagnetischen Körper. Die bisher vorgetragene Theorie vermag das Verhalten gerade derjenigen Körper, deren Permeabilität μ beträchtlich größer als 1 ist, und die allein eine dauernde Magnetisierung annehmen können, nur annähernd zu beschreiben. Dahin gehören neben Eisen und einem Teile seiner Legierungen das Nickel, sowie gewisse von Heusler entdeckte Legierungen aus an sich unmagnetischen Metallen. Da alle diese Stoffe im wesentlichen sich wie das reine Eisen verhalten, so nennt man sie ferromagnetische Körper.

4a) Die Magnetisierungskurve. Die Uebersicht über das magnetische Verhalten des Eisens wird außerordentlich erschwert durch die Tatsache, daß der magnetische Zustand, den ein gegebenes Stück Eisen in einem gegebenen Felde $\mathfrak{H}_0$ annimmt, außer von dem Felde $\mathfrak{H}_0$ auch noch von den Feldern abhängt, denen das Eisen früher einmal ausgesetzt gewesen ist. Insbesondere wird ein vor der Einwirkung des Feldes $\mathfrak{H}_0$ unmagnetisches Stück Eisen im allgemeinen keineswegs wieder unmagnetisch, wenn das Feld $\mathfrak{H}_0$ verschwindet; es behält vielmehr einen gewissen Teil von der durch $\mathfrak{H}_0$ induzierten Magnetisierung $\mathfrak{J}$ dauernd zurück. In dieser „Hysterese" genannten Eigenschaft des Eisens liegt ja allein die Möglichkeit der Herstellung künstlicher Magnete. Die zurückgebliebene Magnetisierung hätten wir nach der vorhin skizzierten elementaren Theorie als wahre Magnetisierung anzusehen. Es zeigt sich aber, daß ihr eine wesentliche Eigenschaft der früher so bezeichneten Größe fehlt: sie ist von den auf den Magnet einwirkenden äußeren Feldern nicht unabhängig. Ueberhaupt zeigt sich, daß die Unterscheidung zwischen der wahren und der induzierten Magnetisierung im allgemeinen keinen rechten Sinn mehr hat. Das schließt natürlich nicht aus, daß sie in speziellen Fällen gute Dienste tun kann.

Die Erfahrung hat gelehrt, daß sich das Verhalten der ferromagnetischen Körper im wesentlichen durch die beiden Vektoren $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ beschreiben läßt, die nach der Faraday-Maxwellschen Theorie den Zusammenhang zwischen dem elektrischen und dem magnetischen Felde vermitteln. Die erste dieser grundlegenden Beziehungen, das Faradaysche Induktionsgesetz haben wir in Gleichung D (Abschnitt 3e S. 569) formuliert; sie setzt die Induktion $\mathfrak{B}$ in Beziehung zur elektrischen Umlaufspannung. Auch das zweite Grundgesetz haben wir bei der Betrachtung des geschlitzten Ringmagnets schon angewendet; es besagt, daß der 4π-fache elektrische Gesamtstrom $4\pi I$, der eine beliebige Fläche S durchsetzt, gleich ist der magnetischen Umlaufspannung $\Sigma \mathfrak{H}_l dl$ um den Rand l der Fläche S. Dabei soll der Rand im Uhrzeigersinne umlaufen werden, wenn der Beschauer in Richtung des Stromes blickt.

$$\Sigma \mathfrak{H}_l dl = 4\pi I \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad E)$$

Diese Gleichung ist nichts anderes als die allgemeinste Form des Ohmschen Gesetzes für den magnetischen Kreis; wenn kein Strom fließt, so geht sie in den speziellen Fall der Gleichung C (Abschnitt 3a S. 566) über, die für das Feld permanenter Magnete allgemeine Gültigkeit besitzt. Es ist hier nicht der Ort,

einzugehen auf die Anwendungen dieser beiden Grundgesetze (Gleichungen D und E), die das ganze Gebiet der elektromagnetischen Erscheinungen beherrschen; für uns sind hier nur die Beziehungen von Bedeutung, die zwischen der magnetischen Induktion $\mathfrak{B}$ und der magnetischen Feldstärke $\mathfrak{H}$ bestehen.

Durch die Gleichung:

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi\mathfrak{J} \quad . \quad . \quad . \quad . \qquad (F)$$

definieren wir die „Magnetisierung" $\mathfrak{J}$; diese Größe ist identisch mit der, die wir früher „freie Magnetisierung" genannt haben; sie bedeutet aber zunächst nur eine Rechnungsgröße. Eine selbständige Bedeutung gewinnt sie erst durch ihre besonderen Eigenschaften, auf die wir im folgenden noch zurückkommen werden, und durch die Erklärung, die man jenen Eigenschaften in der Elektronentheorie auf Grund der früher entwickelten Vorstellungen von den magnetischen Molekeln (Abschnitt 2g) gegeben hat (vgl. den Artikel „Elektron").

Ein einfacher Zusammenhang zwischen $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ (oder $\mathfrak{J}$ und $\mathfrak{H}$) ergibt sich nur in wenigen Fällen. 1. Wenn man, vom vollkommen unmagnetischen Zustande ausgehend, $\mathfrak{H}$ von null aus steigert, so nimmt $\mathfrak{B}$ die durch die punktierte Kurve OD_2 (Fig. 7) gegebenen Werte an (Nullpunktskurve). 2. Wenn $\mathfrak{H}$ zwischen zwei Grenzen $\mathfrak{H}_1$ und $\mathfrak{H}_2$ stetig und periodisch schwankt, so verlaufen die Aenderungen von $\mathfrak{B}$ nach Ablauf einiger Kreisläufe auch periodisch. Ist z. B. $\mathfrak{H}_1 = -\mathfrak{H}_2$, so vermittelt die in Figur 7

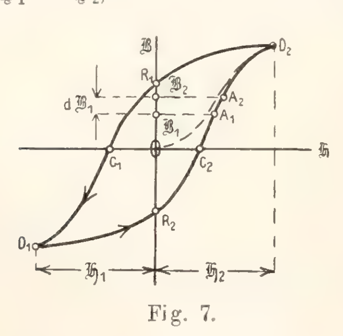


Fig. 7.

ausgezogene Magnetisierungskurve den Zusammenhang zwischen $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$; die Kurve wird in Pfeilrichtung durchlaufen. Wenn das Feld $\mathfrak{H}$, von positiven Werten ausgehend, auf null sinkt, so bleibt eine positive, „remanente" Induktion $\mathfrak{B}_r = OR_1$ bestehen. Um die Induktion vollends auf null zu bringen, bedarf es eines negativen — entgegenwirkenden — Feldes OC_1. Für dieses hat sich der Name „Koerzitivkraft" eingebürgert. Wegen der in der Kurve eindringlich zum Ausdruck kommenden Hystereseerscheinung heißt diese kurz die Hysteresiskurve; $D_1C_2D_2$ ist ihr aufsteigender, $D_2C_1D_1$ ihr absteigender Ast.

4b) Energieverlust durch Hysterese. Aus den Grundgleichungen (D) und (E) ergibt sich, daß bei dem Uebergange aus dem durch den Punkt A_1 (Feldstärke $\mathfrak{H}_1$) der Hysteresiskurve gekennzeichneten magnetischen Zustand in den durch A_2 bestimmten ein Energiebetrag von der Größe

$$d\Psi = \frac{1}{4\pi}\,\mathfrak{H}_1 d\mathfrak{B}_1 = \frac{\text{Fläche } A_1A_2\mathfrak{B}_2\mathfrak{B}_1}{4\pi}$$

in der Raumeinheit gebunden wird. Daraus folgt, daß bei unserem Zyklus zum Aufbau des magnetischen Feldes von dem Werte $\mathfrak{B}=0$ als Ausgangspunkt bis zu dem Werte $\mathfrak{B}_1 = O\mathfrak{B}_1$ die Energie

$$\Psi = \frac{1}{4\pi}\sum_{\mathfrak{B}=0}^{\mathfrak{B}=\mathfrak{B}_1}\mathfrak{H}d\mathfrak{B} = \frac{\text{Fläche } OC_2A_1\mathfrak{B}_1O}{4\pi}$$

in der Raumeinheit gebraucht wird. Man kann hier aber nicht sagen, daß Ψ die im Felde aufgespeicherte „magnetische Energie" sei; denn der betrachtete Vorgang der Erzeugung des Feldes ist nicht umkehrbar (wenn man die Feldstärke $\mathfrak{H}_1$ wieder auf den Betrag OC_2 bringt, so gelangt man nicht wieder zu dem Punkte C_2 mit der Induktion $\mathfrak{B}=0$). Wir können hier nur den folgenden Schluß ziehen: Wenn wir, von irgendeinem Punkte der Hysteresiskurve ausgehend, einen vollen Kreislauf beschreiben, also zu demselben magnetischen Zustand zurückkehren, so heben sich die Energieflächen Ψ infolge der Schleifenform der $\mathfrak{B}\mathfrak{H}$-Kurve, d. h. wegen der Erscheinung der Hysterese, nicht auf; ihre Summe ist vielmehr gleich dem von der Schleife eingeschlossenen Flächeninhalt S. Daher wird beim Durchlaufen des magnetischen Kreislaufs der Energiebetrag

$$\Psi_0 = \frac{1}{4\pi}\sum_S \mathfrak{H}d\mathfrak{B} = \frac{S}{4\pi} \quad . \quad . \quad . \quad 28)$$

verbraucht.[1]) Ψ_0 erscheint in Form von Wärme wieder. Man nimmt daher an, daß der Ummagnetisierung des Materials — Richtungsänderung der magnetischen Molekeln — eine Art innerer Reibung entgegenwirkt; im Einklang damit steht die Beobachtung, daß die Hysterese geringer wird, wenn man das Eisen während des Kreislaufs mechanisch erschüttert.

4c) Der Sättigungswert der Magnetisierung. Trägt man über $\mathfrak{H}$ statt der Induktion $\mathfrak{B}$ die Magnetisierung $\mathfrak{J}$ auf, so zeigt sich die bemerkenswerte Tatsache, daß $\mathfrak{J}$ mit wachsendem $\mathfrak{H}$ einem endlichen Grenzwert $\overline{\mathfrak{J}}$ zustrebt: das Eisen ist magnetisch „gesättigt". Dieser Zustand wird nach Versuchen, die Ewing und Low

[1]) Warburg Wied. Ann. Bd. 13 (1881), S. 141.

(Phil. Trans. A. Bd. 180 (1889) S. 221) und du Bois (Phil. Mag. Bd. 29 (1890) S. 293) mit Feldstärken bis $\mathfrak{H} = 25000$ ausgeführt haben, bei etwa $\mathfrak{H} = 2000$ erreicht. Neuerdings haben Hadfield und Hopkinson (Journ. of the Inst. of electr. eng. Bd. 46 1911 S. 235) durch eine sehr sorgfältig ausgeführte Untersuchung einige wichtige Gesetzmäßigkeiten des Sättigungswerts $\bar{\mathfrak{J}}$ entdeckt:

1. $\bar{\mathfrak{J}}$ hängt nur von der molekularen Beschaffenheit des Stoffes ab; der physikalische Zustand, wie er sich z. B. in der Mikrostruktur äußert, und mit dem sich die Form der Magnetisierungskurve oft so sehr ändert, ist ohne Einfluß.

2. Der Sättigungswert eines Gemisches ist

$$\bar{\mathfrak{J}} = v_1 \bar{\mathfrak{J}}_1 + v_2 \bar{\mathfrak{J}}_2 + \ldots$$

Darin sind die $\bar{\mathfrak{J}}_1$, $\bar{\mathfrak{J}}_2$ . . . die Sättigungswerte der einzelnen Komponenten, die v_1, v_2 deren spezifische Volumina.

3. Den höchsten Sättigungswert von allen Stoffen hat reines Eisen, nämlich

$$\bar{\mathfrak{J}}_0 = 1680.$$

Der Wert ist auf etwa 1 % genau. Obwohl die Magnetisierung gerade des reinen Eisens in schwachen Feldern durch mechanische Beanspruchungen, Hämmern und andere Arten der Bearbeitung stark geändert wird, so wird doch $\bar{\mathfrak{J}}_0$ durch mechanische Beanspruchungen, sogar wenn sie die Elastizitätsgrenze überschreiten, nicht beeinflußt. Bei steigender Temperatur nimmt $\bar{\mathfrak{J}}_0$ erst langsam (bei 200° C eben merklich), dann immer schneller ab; bei 750° C verschwindet der Rest der Magnetisierung ziemlich plötzlich fast vollständig.

4. Weiches Eisen mit einem Gehalt von c % Kohlenstoff ohne andere Beimischungen hat einen Sättigungswert

$$\bar{\mathfrak{J}} = \bar{\mathfrak{J}}_0 \left(1 - \frac{6c}{100}\right).$$

Durch Härten wird $\bar{\mathfrak{J}}$ ziemlich stark, aber in einem etwas unbestimmten Maße vermindert, offenbar weil der Härtungsprozeß ein sehr mangelhaft definierter Vorgang ist.

5. Stoffe mit hoher Koerzitivkraft haben nicht nur einen geringeren Sättigungswert, sondern sie erreichen ihn auch erst in stärkeren Feldern; die folgende Zusammenstellung gibt Beispiele hierfür.

Stoff	$\frac{\bar{\mathfrak{J}}}{\bar{\mathfrak{J}}_0}\,100$	$\frac{\mathfrak{J}}{\bar{\mathfrak{J}}_0}\,100$ bei $\mathfrak{H} = 45$	Koerzitivkraft[1])
Reines Eisen (nur 0,04 % C, 0,07 % Si)	100	100	1,10
Eisen mit 0,58 % C	96,6	93,0	2,56
„ „ 1,05 „ C	94,1	83,5	6,43
„ „ 2,23 „ Mn	95	87,5	6,0
„ „ 4,68 „ Mn	91,6	49,5	19,6
„ „ 7,00 „ Mn	74	23	20,0
„ „ 1,10 „ W	98,5	95,5	3,25
„ „ 3,40 „ W	95,5	93,5	5,73
„ „ 7,47 „ W	92,5	91,0	9,02
„ „ 3,82 „ Ni	98,5	96,5	2,76
„ „ 11,39 „ Ni	96,0	48,5	17,33
„ „ 12,08 „ Ni	84,3	24,9	22,4
„ „ 2,45 „ Al	97,2	100,5	1,00
„ „ 0,85 „ Al	97,6	95,2	1,80

[1]) Für einen Kreislauf, bei dem die Sättigung noch nicht erreicht war.

4d) Remanenz und Koerzitivkraft. Die Grenzwerte, die die remanente Magnetisierung OM_1 und die Koerzitivkraft OC_1 (Fig. 8) in einem bis zur Sättigung getriebenen magnetischen Kreisprozeß erreichen, sind ebenso wie der Sättigungswert $\bar{\mathfrak{J}}$ Materialkonstanten und für die Beurteilung der magnetischen Eigenschaften des betreffenden Stoffes wichtig. Einige Werte, die von du Bois und Taylor Jones bei nahezu erreichter Sättigung gemessen worden sind (Elektrot. Zeitschr. Bd. 17, 1896, S. 543), zeigt die Tabelle auf nächster Seite.

Eine Anzahl weiterer Angaben findet sich in dem Buch „Der Elektromagnet“ von S. P. Thompson (Halle 1894) S. 341. Mit größter Sorgfalt und Präzision aufgenommene Nullpunkts- und Hysteresiskurven des weichen Eisens, des weichen und des gehärteten Remystahles und des Nickels gibt R. Gans (Ann. Phys. (4) Bd. 33 (1910 S. 1065).

Nr.	Stoff	Remanenz OM_1	Koerzitivkraft OC_1	Hysteresisverlust Ψ_0 in Kiloerg	Magnetisierungsbereich $\mathfrak{J}_{max}$
1.	Schwedisches Walzeisen	550	0,8	6,6	1380
2.	Dynamostahlguß	600—650	1,7—2,1	12,5—17,0	1430
3.	Haarlemer Magnetstahl, hart, von N. van Wetteren, Haarlem	800	56	210	1270
4.	Magnetstahl von Gebr. Böhler u. Co., Wien — weich	790	34	145	1420
	— sehr hart	600	75	225	1150
5.	Wolframstahl von der Bergisch. Stahl-A.-G., Remscheidt — weich	850	35	140	1320
	— hart	850	53	205	1320
	— sehr hart	800	77	275	1280

4e) **Umkehrbare magnetische Vorgänge.** Die Entdeckung dieser Vorgänge durch R. Gans (1908) hat einiges Licht in das noch vielfach dunkle Gebiet der ferromagnetischen Erscheinungen gebracht; erst durch sie hat sich eine Reihe von Eigentümlichkeiten des Verhaltens der Magnete erklären lassen.

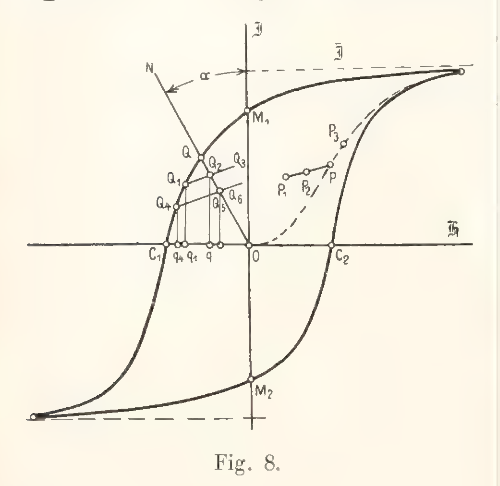


Fig. 8.

Ein Körper sei homogen magnetisiert; wir können z. B. annehmen, daß der magnetische Zustand durch stetige Steigerung von $\mathfrak{H}$ vom unmagnetischen Zustand aus hergestellt worden ist, und daß er somit etwa dem Punkte P auf der Nullpunktskurve entspricht (Fig. 8). Doch ist diese spezielle Annahme für den Bestand des Folgenden ohne Belang, und an jede andere Annahme über die Entstehung des Feldes ließen sich die folgenden Betrachtungen sinngemäß ebenso anknüpfen. Wird in P eine den vorhergehenden entgegengesetzte geringe Feldänderung $d\mathfrak{H}_1$ vorgenommen, so rückt der den Zustand definierende Punkt von P nach P_1. Es zeigt sich nun experimentell, 1. daß die Neigung der Geraden PP_1 der Größe von $d\mathfrak{H}_1$ unabhängig ist, 2. daß bei einer in P_1 vorgenommenen Feldverstärkung $d\mathfrak{H}_2$ der neue definierende Punkt P_2 wiederum auf P_1P liegt, 3) daß überhaupt der magnetische Zustand für beliebige geringe Feldänderungen immer durch Punkte der Geraden PP_1 definiert ist. Die Aenderungen sind also umkehrbar, Hysterese tritt nicht auf, immer vorausgesetzt, daß die Feldänderungen $d\mathfrak{H}$ klein sind und daß insbesondere $\mathfrak{H}$ nie größer wird, als dem Punkt P entspricht; anderenfalls würde der definierende Punkt P nicht-umkehrbar auf der Nullpunktskurve weiterrücken, etwa nach P_3.

Der Geraden P_1P im $\mathfrak{J},\mathfrak{H}$-Diagramm entspricht wieder eine Gerade im $\mathfrak{B},\mathfrak{H}$-Diagramm, so daß wir ähnlich wie in dem idealen Falle der Figur 6, nur mit der Beschränkung auf einen entsprechend kleinen Geltungsbereich, setzen können

$$\mathfrak{B} = \mu_r \mathfrak{H} + 4\pi \mathfrak{M}_w \quad . \; . \; . \; . \quad 29)$$

und, mit

$$\varkappa_r = \frac{\mu_r - 1}{4\pi}\,;\ \mathfrak{J}_r = \varkappa\,\mathfrak{H}, \quad . \; . \quad 29\,a)$$

$$\mathfrak{B} = \mathfrak{H} + 4\pi(\mathfrak{J}_r + \mathfrak{M}_w) \quad . \; . \; . \quad 29\,b)$$

μ_r heißt die **reversible** (umkehrbare) **Permeabilität**, $\varkappa_r$ die **reversible Suszeptibilität**; es gelten bezüglich der umkehrbaren Vorgänge wieder die Beziehungen der elementaren Theorie und auch die Unterscheidung zwischen der wahren Magnetisierung $\mathfrak{M}_w$ und der induzierten $\mathfrak{J}_r$ hat wieder ihren guten Sinn.

Es hat sich außerdem herausgestellt, daß $\varkappa_r$ zwar von der Lage des Punktes P auf der Magnetisierungskurve abhängt, daß jedoch $\varkappa_r$ bei einer bestimmten Magnetisierung $\mathfrak{J}$ $(= \mathfrak{J}_r + \mathfrak{M}_w)$ so gut wie unabhängig von der magnetischen Vorgeschichte ist. $\varkappa_r$ ist also eine eindeutige Funktion φ der Magnetisierung; drückt man diese in Teilen des Sättigungswertes $\bar{\mathfrak{J}}$ aus, so ist φ sogar **für alle Stoffe dieselbe Funktion:**

$$\varkappa_r = \varkappa_0\,\varphi\left(\frac{\mathfrak{J}}{\bar{\mathfrak{J}}}\right) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad 30)$$

Nimmt man zu φ einen Faktor hinzu, derart, daß $\varphi(0) = 1$ wird, so bedeutet $\varkappa_0$ die An-

fangssuszeptibilität (für $\mathfrak{J}=0$). Die Gleichung (30) drückt das Gesetz der korrespondierenden magnetischen Zustände aus.

Neuerdings ist es Gans gelungen, die Funktion φ theoretisch zu berechnen (Gött. Nachr. 1910 28. Mai); er fand, wenn man

$$\frac{\mathfrak{J}}{\overline{\mathfrak{J}}} = \mathfrak{Cotg}\, x - \frac{1}{x} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 30a)$$

setzt,

$$\varphi\left(\frac{\mathfrak{J}}{\overline{\mathfrak{J}}}\right) = \frac{\varkappa_r}{\varkappa_o} = 3\left(\frac{1}{x^2}\right) - \frac{1}{\mathfrak{Sin}^2 x} \quad \ldots\ldots \quad 30b)$$

Hiernach ist es also möglich, durch Wahl beliebiger Werte von x zusammengehörige Werte von $\mathfrak{J}/\overline{\mathfrak{J}}$ und $\varkappa_r/\varkappa_o$ zu berechnen. Die so ermittelte theoretische Kurve stimmt mit der durch den Versuch bestimmten ausgezeichnet überein (Phys. Zschr. Bd. 12, 1911, S. 1053); hierin darf man einen erfolgverheißenden Anfang einer Theorie der Magnetisierungskurve erblicken.

Bisher war angenommen, daß die Feldänderung $d\mathfrak{H}$ in die Richtung des Gesamtfeldes $\mathfrak{H}$ fällt. Auch wenn $d\mathfrak{H}$ auf $\mathfrak{H}$ senkrecht steht, werden die magnetischen Zustandsänderungen bei kleinem $d\mathfrak{H}$ umkehrbar. Die hierdurch definierte transversale reversible Suszeptibilität $\varkappa_t$ weicht jedoch von $\varkappa_r$ ab, besonders für stärkere Felder $\mathfrak{H}$. Das Eisen wird also unter der Wirkung des Feldes $\mathfrak{H}$ reversiblen Vorgängen gegenüber anisotrop, und zwar so wie ein einachsiger Kristall. In den meisten Fällen wird man aber wohl von dieser nicht sehr erheblichen Anisotropie absehen können.

Die reversiblen magnetischen Vorgänge geben uns auch das Mittel an die Hand zu der (sonst unmöglichen) exakten Ableitung der mechanischen Kräfte, die auf ferromagnetische, mit Hysterese behaftete Körper in dem magnetische Felde wirken. Man kann zeigen, daß wenn ein Magnet (als starrer Körper betrachtet) in dem Felde aus einer Lage 1 in eine andere benachbarte Lage 2 gebracht wird, die magnetische Energie des Systems um denselben Betrag zunimmt, um den die Größe

$$U = \frac{1}{8\pi} \Sigma \mu_r \, \mathfrak{H}^2 d\tau$$

bei dieser Lagenänderung wächst ($d\tau$ ein Raumteilchen, $\mathfrak{H}$ die Feldstärke, μ_r die reversible Permeabilität in $d\tau$). Also:

$$W_{m\,2} - W_{m\,1} = U_2 - U_1 \quad \ldots \quad 31)$$

4f) Tragkraft der Magnete. Aus Gleichung (31) läßt sich weiter ableiten,[1]) daß die Kraft, mit der ein Magnet auf seinen Anker wirkt, den Betrag hat[2])

$$\mathfrak{K} = \frac{\mathfrak{B}^2 F}{8\pi} \quad \ldots\ldots \quad 32)$$

Hierbei ist vorausgesetzt, daß die Induktionslinien die ebene Tragfläche F überall senkrecht und mit derselben Dichte durchsetzen.

Ist die Voraussetzung nicht erfüllt, so läßt sich die auf den Anker wirkende Kraft aus den auf seine Oberflächenelemente dS wirkenden Normalspannungen $\mathfrak{N}$ (geometrisch) zusammensetzen:[1])

$$\left.\begin{aligned} \mathfrak{K} &= \Sigma\, \mathfrak{N} dS \quad \ldots\ldots\ldots \\ \mathfrak{N} &= \frac{\mu - 1}{8\pi\mu}\left(\mathfrak{B}_N{}^2 + \mu\, \mathfrak{B}_T{}^2\right) \end{aligned}\right\} \ldots 33)$$

$\mathfrak{B}_N$ ist die zu dS normale, $\mathfrak{B}_T$ die tangentiale Komponente der Induktion in Luft am Orte von dS. Bei großen Werten von μ kann hiernach $\mathfrak{K}$ erheblich größer werden, als der sogenannten Maxwellschen Formel (32) entspricht, selbst wenn die Richtung von $\mathfrak{B}$ in der Luft nur wenig von der Normalen abweicht.[2])

Das früher viel benutzte Bernoullische oder Häckersche[3]) Gesetz

$$\mathfrak{K} = \text{const}\, G^{\frac{2}{3}}$$

(G das Gewicht des Magnets) drückt den nur annähernd richtigen Satz aus, daß die Tragkraft geometrisch ähnlicher und gleich stark magnetisierter Magnete (gleiches $\mathfrak{M}$) der Polfläche F proportional ist (Gl 32; S. P. Thompson, der Elektromagnet, S. 112). Bei guten Hufeisenmagneten ist die Konstante etwa 20, wenn G und $\mathfrak{K}$ in kg ausgedrückt sind.

5. Eigenschaften und Herstellung permanenter Magnete. 5a) Einfluß der Form. Das Verhalten eines Magnets wird außer vom Material und von der Art der Magnetisierung wesentlich durch die Form mitbestimmt. Etwas Genaueres läßt sich darüber jedoch nur für gewisse einfache Formen aussagen, nämlich für beinahe geschlossene Ring- oder Hufeisenmagnete und für Ellipsoid- und Stabmagnete. Wir denken[4]) uns einen dieser Magnete durch ein äußeres Feld $\mathfrak{H}$ stark magnetisiert und dann $\mathfrak{H}$ allmählich auf null gebracht (Fig. 8). Die zurückbleibende remanente Magnetisierung ruft im Jnnern des Magnets eine entgegenwirkende Feldstärke $\mathfrak{H} = -N\mathfrak{J}$ (N = Entmagnetisierungsfaktor) hervor, und der ma-

---

[1]) Gans Ann. Phys. (4) Bd. 27 1908 S. 34.

[2]) Diese Zugkraftformel ist seit langem bekannt; sie wurde jedoch immer nur unter Vernachlässigung der hysteretischen Eigenschaften des Eisens abgeleitet.

[1]) F. Emde, Elektrot. und Masch. Wien 1906 S. 976 Fußnote; W. Kaufmann in Müller-Pouillets Physik 10. Aufl. Bd 4 S. 87 Braunschweig 1908.

[2]) Vergl. hierzu die von K. Euler ausgeführten Messungen, Berliner Dissertation 1911, sowie die Besprechung dieser Arbeit in der Elektrot. Zeitschrift 1911 S. 1269.

[3]) Pogg. Ann. Bd. 57, 1842, S. 321.

[4]) du Bois und Taylor Jones, Elektrot. Zeitschr., Bd. 17 (1896), S. 543; R. Gans, Theorie des Magnetismus (1908) S. 58.

gnetische Zustand ist somit durch den Schnittpunkt Q der Entmagnetisierungslinie ON ($\operatorname{tg}\alpha = N$) und der Hysteresisschleife definiert.

5b) Das Altern. Der durch Q (Fig. 8) definierte Zustand des „permanenten" Magnet ist nicht stabil. Beim Hinzutreten eines äußeren entmagnetisierenden Feldes oder bei einer Vergrößerung von N (z. B. durch Entfernung des Ankers) sinkt Q auf der Hysteresisschleife etwa nach Q_1 hinab. Hört die zufällige entmagnetisierende Ursache auf, so bewegt sich Q_1 auf der durch das reversible μ_r bestimmten Geraden Q_1Q_3 nach dem auf ON liegenden Punkte Q_2. Dieser bedeutet nun einen stabilen Zustand, insofern als vorübergehende äußere Einwirkungen reversible (durch Q_1Q_3 bestimmte) Aenderungen des magnetischen Zustandes hervorbringen. Dabei darf freilich das gesamte entmagnetisierende Feld den Wert Oq_1 niemals überschreiten, weil sonst unweigerlich eine weitere dauernde Entmagnetisierung eintritt, etwa bis Q_4; nun würden die reversiblen Aenderungen auf der Geraden Q_4Q_6 vor sich gehen. Man ersieht hieraus, daß ein hoher Wert der permanenten Magnetisierung und weitgehende Unabhängigkeit von äußeren Einflüssen einander widersprechende Forderungen sind.

Bei der Herstellung permanenter Magnete pflegt man die Einstellung eines stabilen Zustandes (etwa dem Punkt Q_2 oder Q_5 entsprechend) nicht dem Zufall zu über lassen, sondern sucht diesen Alterungsvorgang künstlich zu beschleunigen. Das einfachste Mittel ist die vorübergehende Wirkung eines entmagnetisierenden Zusatzfeldes; früher hat man das Altern durch Schlagen und wiederholtes Auskochen in mehr oder minder vollkommener Weise hervorgebracht.[1]) Die alternde Wirkung des Auskochens beruht auf der Abnahme der Magnetisierung mit steigender Temperatur.

Die Frage „was bleibt in einem permanenten Magneten konstant?" ist vor einer Reihe von Jahren ausführlich erörtert worden.[2]) Auf Grund des Vorhergehenden können wir sagen, daß nur gealterte Magnete „permanent" sind, und dies auch nur insofern, als

1. vorübergehende äußere Einflüsse von begrenzter Stärke (Zusatzfelder, Aenderung der Lage von Eisenmassen usw.) den magnetischen Zustand nur vorübergehend ändern;

2. diese Aenderungen das Gesetz (Gleichung 29)

$$\mathfrak{B} = \mu_r \mathfrak{H} + 4\pi \mathfrak{M}_w$$

befolgen, worin μ_r und $\mathfrak{M}_w$ konstant sind.

Andere Eigenschaften, die man gelegentlich als „konstant" befunden hat, sind dieses nur in speziellen Versuchsanordnungen.

5c) Die Wahl des Stoffes und des Härtungsgrades. Aus dem Vorhergehenden folgt, daß Stoffe mit hoher Remanenz OM_1 (Fig. 8) nur dann starke Magnete liefern, wenn sie zugleich eine hohe Koerzitivkraft OC_1 besitzen. Diese ist nach Figur 8 um so wichtiger, je größer der Entmagnetiiesrungsfaktor N (d. h. je größer der Winkel α) ist und je mehr Wert auf weitgehende Permanenz gelegt wird.

Nun wissen wir (Nr. 4c), daß hohe Koerzitivkraft mit einer Verringerung des Sättigungswertes $\mathfrak{J}$ und der Remanenz OM_1 einhergeht, gleichgültig, ob jene durch hohe Härtegrade beim Stahl oder durch Wolfram-, Mangan-, Nickel oder andere Zusätze erzielt wird. Daher empfehlen sich diese Mittel 1. vor allem bei Magneten gedrungener Form oder mit weitem Luftschlitz, bei denen der Entmagnetisierungsfaktor N groß ist; 2. dort, wo es mehr auf Permanenz, als auf Stärke der Magnetisierung ankommt. Umgekehrt ist für langgestreckte Stabformen ein geringerer Härtegrad vorteilhaft.

5d) Lamellarmagnete. Stärkere Magnete, sowohl von Stab- als von Hufeisenform, baut man vorteilhaft aus mehreren aufeinandergelegten Blättern auf. Ein Grund hierfür ist zunächst der Umstand, daß es technisch fast unmöglich ist, dickere Stahlstücke gleichmäßig zu härten. Außerdem ist es nützlich, die Blätter einzeln zu magnetisieren, da sie ihres geringeren Entmagnetisierungsfaktors N wegen in einem gegebenen Felde $\mathfrak{H}_0$ eine stärkere Magnetisierung annehmen, als der zusammengesetzte Magnet.[1]) Das Feld $\mathfrak{H}_0$ erzeugt in diesem, entsprechend dem größeren N des dickeren Stabes (Abschnitt 3c) ein geringeres Maximalfeld; da dieses beim harten Stahl mit den gebräuchlichen Anordnungen zur Erzielung der Sättigung bei weitem nicht ausreicht, so wird ihm auch eine geringere Remanenz entsprechen. Zur Erzielung größerer Tragkraft läßt man die mittleren Blätter hervorstehen, so daß nur die Endflächen dieser Blätter als tragende Polflächen dienen.

Die Erklärung hierfür ergibt sich, wenn man Gleichung (32) in der Form

$$\mathfrak{K} = \frac{(\mathfrak{B}F)^2}{8\pi F}$$

schreibt. Der Induktionsfluß ($\mathfrak{B}F$) ist in roher Annäherung als konstant zu betrachten; $\mathfrak{K}$ ist dann umgekehrt proportional der Polfläche F.

---

[1]) Strouhal und Barus, Wied. Ann. Bd. 20 (1883), S. 662.

[2]) J. Busch, Elektrot. Zeitschr. Bd. 22 (1901), S. 234; Bd. 25 (1904), S. 118, 309. F. Emde l. c. Bd. 24 (1903), S. 949. H. Weichsel l. c. Bd. 25 (1904), S. 34. R. Hiecke l. c. Bd. 25 S. 35, 205. M. Korndörfer l. c. S. 101. H. Eichel, Diss. Halle 1903.

[1]) Ascoli, Rendi C. Acc. Lincei, Bd. 6 (1897), S. 61.

Literatur. *Aeltere Literatur:* ***J. Dub,*** *Der Elektromagnetismus. Berlin 1861.* — ***M. Faraday,*** *Experimental Researches.* — ***W. Gilbert,*** *De magnete, magnetisque corporibus et de magno magnete tellure. London 1600.* — ***Jamin,*** *Comptes Rendus 1873, S. 72; Journal de Phys. (1) Bd. 5, 1876.* — ***A. Kircher,*** *Ars magnetica. Köln 1673.* — ***J. Lamont,*** *Handbuch des Magnetismus. Leipzig 1867.* — ***P. Prevost,*** *De l'origine des forces magnétiques. Genf 1788.* — ***Scoresby,*** *Magnetical Investigations.* — ***S. Savary,*** *Magnetical Observations and Experiments; Phil. Trans. Bd. 36 (1729), S. 295.* — *Neuere Literatur:* ***Abraham-Föppl,*** *Theorie der Elektrizität I. Leipzig 1907.* — ***H. du Bois,*** *Magnetische Kreise. Berlin 1894.* — ***E. Cohn,*** *Das elektromagnetische Feld. Leipzig 1900.* — ***J. A. Ewing,*** *Magnetic Induction in Iron and other metals. London 1894.* — ***R. Gans,*** *Einführung in die Theorie des Magnetismus. Leipzig 1908; Ann. Phys. Bd. 33 (1910), S. 1065; Phys. Zeitschr. Bd. 12 (1911), S. 1053.* — ***Hadfield and Hopkinson,*** *Journ. of the Inst. of Electrical Eng. Bd. 46 (1911), S. 235.* — ***Ch. Maurain,*** *Le magnétisme du fer. Paris 1905.* — ***J. Cl. Maxwell,*** *A Treatise on Electricity and Magnetism. Oxford 1873 und Berlin 1883.* — ***S. P. Thompson,*** *Der Elektromagnet. Halle 1894.*

K. W. Wagner.

Magnetfeld.

1. Begriffe und Definitionen: a) Begriff des Feldes und Ziel der Forschung. b) Stärke des Feldes. c) Pole und magnetische Mengen. d) Definition und Messung der Feldstärke. e) Vektordarstellung der Feldstärke $\mathfrak{H}$. f) Zurückführung der Felderscheinungen auf $\mathfrak{H}$. 2. Das $\mathfrak{H}$-Linienbild des Feldes: a) Definition der $\mathfrak{H}$-Linien. b) Verlauf der $\mathfrak{H}$-Linien. c) Eisenfeilbild der $\mathfrak{H}$-Linien. d) Feld eines einzelnen Poles nach Richtung und Stärke durch $\mathfrak{H}$-Linien dargestellt. e) Zerlegung von $\mathfrak{H}$ in Komponenten. f) Zusammensetzung von $\mathfrak{H}$-Linienbildern. g) Erhaltung des $\mathfrak{H}$-Linienflusses im Felde eines einzelnen Poles und Uebertragung auf beliebige Felder. Gleichförmiges Feld. 3. Allgemeine Gesetze des statischen Feldes: a) Statische und elektromagnetische Felder. b) Niveau- oder Aequipotentialflächen. c) Potentialdifferenz und Potential. d) Feldstärke und Potentialgefälle. e) Potentialdarstellung des Feldes. f) Uebergang der $\mathfrak{H}$-Linien aus einem Medium in ein anderes. 4. Das Superpositionsprinzip und seine Anwendungen: a) Das Superpositionsprinzip für den Fall der magnetischen Gleichartigkeit aller Körper. b) Magnetisches Moment. Magnetisierung und $\mathfrak{J}$-Linien. c) $\mathfrak{J}$-Linien und magnetische Mengen. d) Solenoidale Magnetisierung. e) Feld der Doppelschicht. f) Magnetomotorische Kraft der Doppelschicht. 5. Das Feld elektrischer Ströme: a) Der lineare Strom als Element beliebiger Strömung. b) Gleichwertigkeit von linearem Strom und Doppelschicht. c) Die $\mathfrak{H}$-Linien des linearen Stromes. d) Magnetomotorische Kraft im Stromfelde. e) Unbestimmtheit des Potentiales. Feld im Mittelpunkt eines linearen Kreisstromes. f) Felder von geradem Draht, Solenoid, Toroid. 6. Das $\mathfrak{B}$-Linienbild des Feldes: a) Das $\mathfrak{H}$-Linienbild als Repräsentant der Felderscheinungen. b) Gesetze der Induktion. Der Vektor $\mathfrak{B}$. c) Endlosigkeit der $\mathfrak{B}$-Linien. d) Zusammenhang von $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ in flüssigen und gasförmigen Körpern. e) Annahmen über den Zusammenhang von $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ in festen Körpern. Wahre magnetische Mengen und wahre Magnetisierung $\mathfrak{J}_0$·$\mathfrak{M}$-Linien. Magnetomotorische Kraft der Magnete.

1. Begriffe und Definitionen. 1. a) Begriff des Feldes und Ziel der Forschung. Magnetisches Feld nennt die Physik jeden Raum, in dem magnetische Erscheinungen zu beobachten sind. Als solche sind eine Fülle von Vorgängen bekannt, z. B. Bewegungen von Magneten und Eisenstücken, Bewegungen beliebiger, im gewöhnlichen Sprachgebrauch als unmagnetisch bezeichneter Körper, Bewegung stromdurchflossener Leiter, Entstehung von elektrischen Strömen in Leitern, Aenderung des elektrischen Widerstandes von Leitern, Beeinflussung der Lichtstrahlung, die das magnetische Feld durchdringt, Veränderung der Lichtaussendung leuchtender Körper u. a. m. Und zwar sind diese auch sonst wohl beobachtbaren Erscheinungen *dann* als *magnetische* anzusprechen, wenn ihr Auftreten an das Vorhandensein von sogenannten permanenten Magneten oder von elektrischen Strömen geknüpft erscheint. Permanente Magnete und elektrische Ströme sind die uns bekannten Quellen magnetischer Felder. Als Ziel der Forschung betrachten wir die Auffindung solcher allgemeiner Gesetze des magnetischen Feldes und solcher den einzelnen vorliegenden Fall kennzeichnender Größen, daß wir auf Grund ihrer Kenntnis imstande sind zu sagen, was in jedem Falle in magnetischer Hinsicht alles geschieht und geschehen muß.

Zur Erläuterung ein Beispiel aus anderem Gebiete. Ueberall beobachten wir Schwerkräfte, deren Quelle die Erde ist. Wir können also sagen, wir befinden uns im „Schwerefeld" der Erde. Im Gegensatz zum magnetischen Feld sind die Aeußerungen des Schwerefeldes sehr einseitig, sie bestehen lediglich in Bewegungsantrieben auf wägbare Körper. Wir können angeben, was in einem bestimmten Falle in mechanischer Hinsicht geschieht, sobald wir das Gravitationsgesetz kennen, sowie die Masse der Erde und der vorhandenen Körper und ihre gegenseitige Anordnung im Raume.

Für die Begriffsbestimmung des magnetischen Feldes ist noch wesentlich die folgende Vorstellung. Man denke sich einen Magneten. Ein zweiter in die Nähe gebrachter Magnet erfährt Kraftwirkungen und wirkt seinerseits auf den ersten zurück. Die beobachtbaren Vorgänge erscheinen als eine Wechselwirkung zwischen den beiden Magneten, das Auftreten der magnetsichen Kraft an das gleichzeitige Vorhandensein der beiden Magnete geknüpft. Der einen Magneten um-

gebende Raum wird also anscheinend erst dadurch zum Feld, daß Körper hineingebracht werden, an denen Feldwirkungen zu beobachten sind. Das ist die Anschauung der alten sogenannten „Fernwirkungstheorie". Gegenwärtig aber verknüpfen wir mit dem Feldbegriffe die Vorstellung, daß durch das Vorhandensein von Magneten oder elektrischen Strömen im Raume ein gewisser Zustand hervorgerufen wird, der unabhängig von der Anwesenheit solcher Körper, an denen wir Feldwirkungen beobachten können, besteht und der sich nur in den mannigfaltigen oben erwähnten magnetischen Erscheinungen äußert. Ganz entsprechend ist z. B. die Lichtempfindung an das Dasein empfindender Wesen geknüpft, und doch sagen wir, der Raum ist auch ohne diese Wesen von Licht erfüllt.

Die Erkenntnis des eigentümlichen magnetischen Feldzustandes ist als weiteres Ziel der Forschung zu betrachten.

1 b) Stärke des Feldes. Jede der zu Anfang genannten magnetischen Erscheinungen kann in verschiedener Stärke auftreten. Es gibt z. B. magnetische Felder, in denen Hunderte von Kilogrammen getragen werden, und solche, in denen eine kaum meßbare Kraftwirkung stattfindet. Dies führt dazu, von einer verschiedenen Stärke oder Intensität des magnetischen Feldes zu reden.

Alle unsere Versuche finden im magnetischen Felde der Erde statt. Dessen Stärke beträgt in Deutschland etwa den 100 000sten Teil der stärksten herstellbaren Felder und ganz ungefähr den 10ten Teil des Feldes eines mittelstarken Stabmagneten von 10 cm Länge im Abstande von 10 cm von der Stabmitte. Man braucht daher bei sehr vielen Versuchen auf das Erdfeld keine Rücksicht zu nehmen. Außerdem kann man sich vor seiner Einwirkung schützen (vgl. den Artikel „Magnetische Influenz" unter 2f).

Der erste Schritt zu dem in a genannten Ziele wird darin bestehen müssen, die Feldstärke scharf und in genau meßbarer Weise zu definieren. Aus welcher der mannigfaltigen Feldäußerungen diese Definition erfolgt, ist an und für sich gleichgültig. Bei der praktischen Wahl scheiden aber sofort die erwähnten optischen Erscheinungen aus, denn sie fangen erst bei sehr starken Feldern an, meßbare Größe zu erreichen. Der historische Weg hat dazu geführt, die Feldstärke aus den bewegenden Kräften zu definieren und zu messen, die auf die sogenannten „Magnetpole" im Felde wirken.

1 c) Pole und magnetische Mengen. Bezüglich des Begriffes der Pole sei folgendes erwähnt. Man lasse zwei Magnete A und B aus sehr großer Entfernung aufeinander einwirken. Diese Wirkung läßt sich auffassen als Wechselwirkung zwischen vier bestimmten Punkten, den Polen, von denen zwei im Magneten A, zwei in B liegen. Die Wirkung zwischen je zweien der Punkte berechnet sich nach dem Coulombschen Gesetze (vgl. den Artikel „Magnete"), indem man den Punkten bestimmte magnetische Mengen zuweist. Sind die den Punkten zuzuweisenden Mengen gleichgroß und die Kraftwirkung zwischen je zweien von solcher Größe, daß sie in dem der Kraftmessung zugrunde gelegten Maßsystem den Wert 1 annehmen würde, wenn der Abstand der beiden Punkte der Einheit gleich wäre, so haben die vier Pole die Stärke 1 in dem betreffenden Maßsystem. Das sogenannte absolute Maßsystem benutzt als Krafteinheit die Dyne. Pol von der Stärke 1 ist also hier der, welcher auf einen gleichen, im Abstande 1 befindlichen, die Kraft 1 Dyne ausübt.

1 d) Definition und Messung der Feldstärke. Unter der Feldstärke oder Intensität des Feldes in einem Punkte P versteht man die Größe der magnetischen Kraft, die auf einen in P befindlichen magnetischen Einheitspol wirkt. Die Stärke 1 hat also ein Feld, in dem auf den Pol von der Stärke 1 die Kraft 1 wirkt. Die Feldstärke kann von Punkt zu Punkt veränderlich sein, sie kann aber auch in gewissen Gebieten einen unveränderlichen Wert haben.

Die einfachste, aber praktisch nicht ausführbare Art der Feldmessung wäre also die, daß man einen nadelförmigen Magneten in das Feld bringt von solcher Länge, daß sein einer Pol sich im Felde, der andere außerhalb des Feldes be-

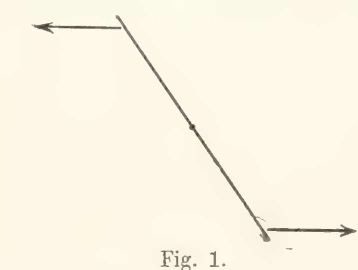


Fig. 1.

findet. Die Pole sollen die Stärke 1 haben. Auf den Pol im Felde wirkt dann eine Kraft, deren Größe, in beliebigem Maße gemessen, zugleich die Stärke des Feldes am Orte des Poles in dem betreffenden Maße angibt.

Das den wirklichen Messungen zugrunde liegende Prinzip ist folgendes: Eine kleine Magnetnadel sei in ihrem Schwerpunkte an einem feinen, sehr weichen Faden (Kokonfaden) aufgehängt, so daß sie sich um den Aufhängepunkt frei nach allen Richtungen drehen kann. Die Pole sollen wieder die Stärke 1 und so kleinen Abstand haben, daß die Stärke des auszumessenden Feldes sich vom einen Pol zum anderen nicht merklich ändert und die Kräfte auf beide parallel gerichtet sind, gleichgültig welche Lage die Nadel hat. Im Felde wirken also auf die Pole gleichgroße Kräfte von entgegengesetzter Richtung (Fig. 1), die die Nadel zu drehen versuchen, bis sie zu den Kraftrichtungen parallel ist. Läßt man aber der magnetischen Drehkraft eine andere von bekannter Größe D entgegenwirken, so nimmt die Nadel eine Gleichgewichtslage an, aus der sich das Verhältnis der magnetischen Kraft zu der

Kraft D berechnen läßt. Man erhält so die Feldstärke im selben Maße wie D, also z. B. in absolutem Maße. Die absolute Einheit der Feldstärke wird technisch als „G a u ß“ bezeichnet.

1 e) V e k t o r d a r s t e l l u n g d e r F e l d s t ä r k e ℌ. Die Kenntnis der Feldstärke in den einzelnen Punkten des Feldes reicht noch nicht aus, um über die Bewegungen von Magnetpolen und — wie sich später zeigen wird — ebenso über alles andere magnetische Geschehen im Felde bestimmte Aussagen zu machen. Dazu müssen wir außer der G r ö ß e der Kraft auf den magnetischen Einheitspol auch noch ihre R i c h t u n g kennen.

Man könnte also von der nach 1 d ausgeführten Feldmessung zum Zwecke einer Uebersicht, zunächst über alle möglichen Bewegungen von Magnetpolen, in der Weise Rechenschaft ablegen, daß man für jeden Punkt des Feldes die Feldstärke — etwa in absolutem Maße — notiert und durch einen in dem Punkte angebrachten Pfeil die Richtung anzeigt, in der etwa ein Nordpol einen Kraftantrieb erfährt. Das Aufzeichnen der Zahlwerte könnte man noch dadurch entbehrlich machen, daß man den Pfeilen verschiedene Längen gibt und zwar jedem Pfeile so viele Längeneinheiten, als der Zahlwert der Feldstärke in dem betreffenden Punkte angibt.

Man nennt eine solche Art der Darstellung des Feldes eine V e k t o r d a r s t e l l u n g , die dadurch wiedergegebene Kraft auf den magnetischen Einheitsnordpol, die Feldstärke, einen V e k t o r. In derselben Weise läßt sich jede physikalische Größe darstellen, die wie die Feldstärke durch einen Zahlwert und eine Richtung vollständig bestimmt ist (vgl. den Artikel „P h y s i k a l i s c h e G r ö ß e n“).

Die praktische Ausführung ist natürlich für die unzähligen Feldpunkte nicht möglich. Für einzelne Punkte aber soll immer ein P f e i l durch seine Länge die Größe der magnetischen Feldstärke anzeigen und durch seinen Weisungssinn die Richtung, in der die magnetische Kraft auf einen Nordpol wirkt. Die so unter dem Bilde eines Pfeiles als Größe von bestimmter Richtung vorgestellte magnetische Feldstärke soll im folgenden immer mit ℌ bezeichnet werden.[1])

1 f) Z u r ü c k f ü h r u n g d e r F e l d e r s c h e i n u n g e n a u f ℌ. Das hier gewonnene Maß für die magnetische Feldstärke wurde abgeleitet aus einer einzelnen der Feldwirkungen. Mit demselben Rechte und, wie sich zeigen wird, sogar vorteilhafter, hätten andere der Felderscheinungen zur Aufstellung eines Feldmaßes dienen können. Zur Erreichung des in 1 a angegebenen Zieles, die magnetischen Vorgänge in einem Felde an der Hand bestimmter gegebener Größen zu übersehen, ist es notwendig, sämtliche Erscheinungen des Feldes auf das Feldmaß ℌ zurückzuführen und ihre Abhängigkeit von der Feldstärke ℌ festzustellen, oder, mathematisch gesprochen, Gleichungen aufzustellen zwischen gewissen Größen, die als Maß für die einzelnen Feldwirkungen dienen können, und der Feldstärke ℌ.

2. Das ℌ-Linienbild des Feldes. 2 a) D e f i n i t i o n d e r ℌ - L i n i e n. Ein Ersatz für die in 1 e angedeutete Vektordarstellung des magnetischen Feldes ist die Darstellung durch die F a r a d a y s c h e n L i n i e n.

In 1 d wurde gezeigt, daß eine kurze, im Schwerpunkt aufgehängte Magnetnadel sich mit ihrer Längsrichtung parallel zur Richtung der Feldstärke ℌ einstellt, und zwar wird der Nordpol der Nadel, wie aus der Definition von ℌ als magnetische Kraft auf den Nordpol 1 folgt, nach der Richtung von ℌ hinweisen.

Man denke sich nun (Fig. 2) den Schwerpunkt der Nadel aus dem Feldpunkte 1 in Richtung der Nadelachse so weit verschoben, bis — in einem Punkte 2 — eine Abweichung der Nadel von ihrer bisherigen Richtung merklich wird. Von 2 werde der Schwerpunkt in derselben Weise weiter geführt nach 3, wo sich die Nadelrichtung wiederum merklich geändert hat usf. Der Schwerpunkt beschreibt so eine aus geraden Stücken zusammengesetzte gebrochene Linie, die bei mehr und mehr gesteigerter Genauigkeit der Beobachtung immer mehr das Aussehen einer stetig gekrümmten Kurve annimmt. Die Nadel bildet dann in jeder Lage die Tangente an die Kurve, oder mit anderen Worten die Kurve hat die Eigenschaft, daß ihre Tangente in irgendeinem Punkte zur magnetischen Kraft in dem Punkte parallel ist. Um aus dem Kurvenbilde auch den W e i s u n g s s i n n der magnetischen Kraft

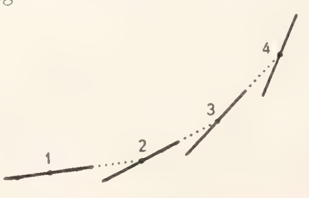


Fig. 2.

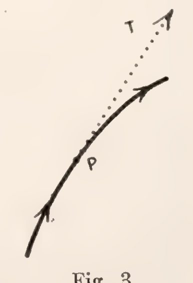


Fig. 3.

[1]) Wo es sich nur um den Z a h l w e r t der Feldstärke handelt, wird dafür das Zeichen H gebraucht.

in einem Kurvenpunkte P (Fig. 3) unmittelbar ablesen zu können, muß man der Kurve einen ganz bestimmten Fortlaufsinn zuweisen und durch eingezeichnete Pfeile andeuten. Die von P aus nach der Seite des Fortlaufs hinweisende Tangente T gibt dann die Richtung von $\mathfrak{H}$ an. Der der Kurve zugehörende Fortlaufsinn ist der, in dem ein einzelner punktförmiger Magnet**nordpol** die Kurve durchlaufen würde.

Die so in bestimmtem Sinne laufende Kurve nennt man eine magnetische **Kraftlinie**, **Feldlinie** oder **Intensitätslinie**. Hier sei sie als $\mathfrak{H}$-Linie bezeichnet.[1])

2b) Verlauf der $\mathfrak{H}$-Linien. Die Verfolgung der $\mathfrak{H}$-Linien mit der bewegten Nadel führt sofort zu der Erkenntnis zweier Grundeigenschaften der Feldstärke $\mathfrak{H}$:

1. Die Nadel hat in einem bestimmten Feldpunkte stets nur eine einzige Einstellungsrichtung, d. h. **durch jeden Punkt des Feldes geht nur eine einzige $\mathfrak{H}$-Linie; es schneiden sich niemals zwei $\mathfrak{H}$-Linien.**

2. Soweit die Absuchung des Feldes mit der Nadel möglich ist — also im ganzen Luftraum oder auch in einer Flüssigkeit, die die Quellen des Feldes umgibt — ändert die Nadel ihre Richtung stets nur allmählich, niemals plötzlich, d. h. **die $\mathfrak{H}$-Linien verlaufen innerhalb jedes einzelnen, das Feld erfüllenden gasförmigen oder flüssigen Mediums stets ohne plötzliche Richtungsänderungen, d. h. Knicke.**

2c) Eisenfeilbild der $\mathfrak{H}$-Linien. Will man, anstatt die einzelne $\mathfrak{H}$-Linie mit der bewegten Nadel zu beschreiben, ihren Verlauf auf einmal übersehen, so könnte man längs der Linie Nadel an Nadel aufhängen. Der Umständlichkeit dieses Verfahrens überhebt die Beobachtung, daß jedes längliche Stückchen unmagnetischen Eisens sich im Magnetfelde verhält wie eine Magnetnadel mit zwei Polen (vgl. den Artikel „**Magnetische Influenz**" unter 8c). Bringt man also etwa einen Stabmagneten in eine zähe Flüssigkeit (Glyzerin), in der Eisenfeilspäne verteilt sind, so ordnen sich diese zu $\mathfrak{H}$-Linien an. Aehnliches ist zu erreichen in Luft mit sehr dünnen weichen Eisendrähten — gewissermaßen Ketten von Eisenspänen — die man mit dem einen Ende an den Magneten hält.

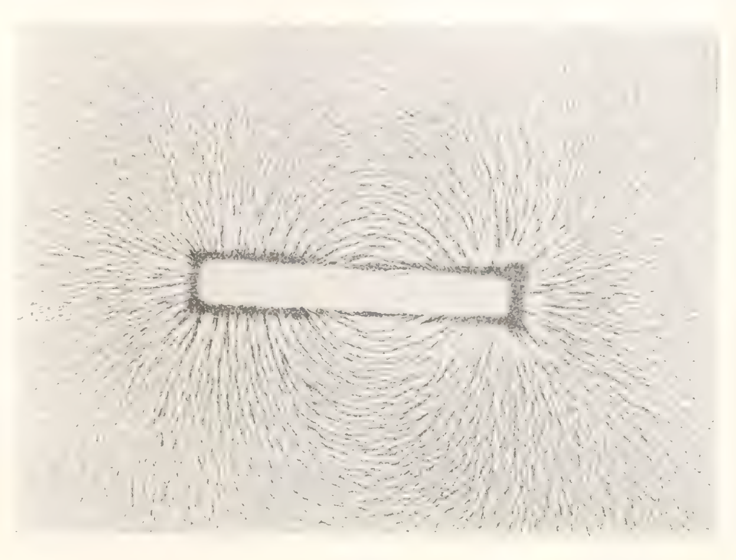


Fig. 4.

Aber auch Beobachtungen in einer Ebene geben ein getreues Bild des $\mathfrak{H}$-Linienverlaufes, sobald die $\mathfrak{H}$-Linien in der Ebene oder senkrecht zu ihr verlaufen, also immer dann, wenn sie eine Symmetrieebene des Feldes ist. So zeigt z. B. Figur 4 den $\mathfrak{H}$-Linienverlauf eines Stabmagneten von rechteckigem Querschnitt in der Ebene, die durch die Längsachse des Stabes geht und zu den zwei breiteren Längsflächen parallel ist.[1])

2d) Feld eines einzelnen Poles nach Richtung und Stärke durch $\mathfrak{H}$-Linien dargestellt. Die $\mathfrak{H}$-Linien lassen zunächst nur die **Richtung**

[1]) Das Wort **Kraftlinie** wird in der Literatur sowohl für die hier definierten Linien als auch für die anderen, später zu behandelnden, Linien gebraucht. Zur Vermeidung von Verwirrungen soll deshalb hier das Wort Kraftlinien gar nicht benutzt werden.

[1]) Herr Dr. **Papalexi** in Straßburg hatte die Freundlichkeit, die hier und im Artikel „**Magnetische Influenz**" wiedergegebenen Eisenfeilbilder photographisch aufzunehmen. Anleitung zur Herstellung von Eisenfeilbildern bei H. **Ebert** Magnetische Kraftfelder.

der magnetischen Feldstärke in den einzelnen Feldpunkten übersehen. Ein kleiner Kunstgriff führt dazu, aus ihrem Verlauf auch zugleich den Betrag der Feldstärke mit beliebiger Genauigkeit abzulesen.

Die Zahl der $\mathfrak{H}$-Linien im Felde ist unbegrenzt. Die wandernde Nadel durchläuft mit ihrem Schwerpunkte eine nach Willkür des Experimentators herausgegriffene beschränkte Zahl davon, ebenso zeichnen die Feilspäne eine dem Zufall unterworfene Auswahl der Linien ganz oder meistens sogar nur stückweise nach, wie ein Blick auf Figur 4 lehrt. Der erwähnte Kunstgriff besteht darin, die Wahl der verfolgten und aufgezeichneten Linien nach einer bestimmten Regel vorzunehmen. Figur 5 erläutere das. Sie soll den $\mathfrak{H}$-Linienverlauf in der Umgebung eines einzelnen, in Luft befindlichen Poles veranschaulichen. Nun gibt es keine in Luft liegenden und auch keine einzelnen Pole. Man kann aber den gedachten Fall mit großer Annäherung dadurch verwirklichen, daß man eine äußerst dünne Stahlnadel nimmt, die so magnetisiert ist, daß die $\mathfrak{H}$-Linien im wesentlichen nur von ihren Endpunkten ausgehen, und die so lang ist, daß der eine Pol am Orte des anderen keine Wirkung mehr hat. Dann ist jede durch die Nadel gehende Ebene als Symmetrieebene des Feldes zu betrachten, und zwar treten keine $\mathfrak{H}$-Linien durch die Ebene hindurch, es verlaufen nur welche in ihr und werden durch aufgestreute Feilspäne

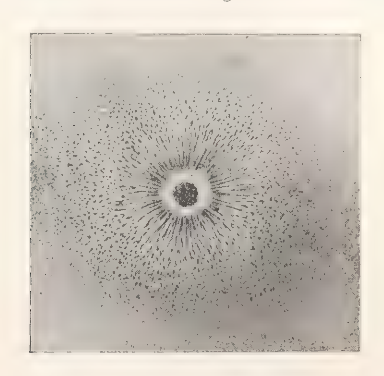


Fig. 5.

nachgezeichnet. Jedes so erhaltene Eisenfeilbild zeigt gerade, nach allen Seiten vom Pole gleichmäßig ausstrahlende $\mathfrak{H}$-Linien, es findet also auch räumlich ein allseitig gleiches Ausstrahlen statt.

Man denke sich nun um den Nordpol N (Fig. 6) eine Kugel 1 vom Radius r_1 beschrieben. Die Oberfläche der Kugel, deren Größe gleich $4\pi r_1^2$ ist, werde in eine beliebige Anzahl gleichgroßer Flächenstücke geteilt. Die durch jedes dieser Flächenstücke hindurchtretenden $\mathfrak{H}$-Linien bilden ein kegelförmiges Bündel, und die Gesamtheit aller vom Pole ausstrahlenden Linien setzt sich aus ebenso vielen Bündeln zusammen, als Flächenstücke auf der Kugel abgeteilt wurden. Die Zahl der Bündel sei z. Es treten dann durch die Flächen**einheit** der Kugel $z_1 = \frac{z}{4\pi r_1^2}$ Bündel hindurch.

Es werde weiter um N eine Kugel 2 mit dem Radius r_2 beschrieben. Deren Ober-

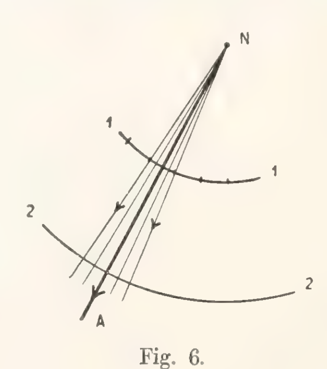


Fig. 6.

fläche ist gleich $4\pi r_2^2$, und es treten durch sie alle die z Bündel hindurch, die durch die Kugelfläche 1 gegangen sind. Durch die Flächen**einheit** also treten hier $z_2 = \frac{z}{4\pi r_2^2}$ Bündel.

Die Zahlen z_1 und z_2 stehen in dem Verhältnis

$$z_1 : z_2 = r_2^2 : r_1^2.$$

Nach dem **Coulomb**schen Gesetze (vgl. den Artikel „**Magnete**") stehen aber die magnetischen Kräfte, die von N auf einen magnetischen Einheitspol im Abstande r_1 und r_2 ausgeübt werden, d. h. die magnetischen Feldstärken H_1 und H_2, ebenfalls in dem Verhältnis

$$H_1 : H_2 = r_2^2 : r_1^2.$$

Es gilt also

$$z_1 : z_2 = H_1 : H_2.$$

Aus der unendlichen Anzahl der von N ausstrahlenden $\mathfrak{H}$-Linien möge jetzt die folgende Auswahl zur Darstellung des Feldes getroffen werden: man zeichne nur die mittelste Linie eines jeden Bündels, die „Achse" A (Fig. 6). Dann entsteht ein Feldbild von der Eigenschaft, daß **die Feldstärke $\mathfrak{H}$ überall die Richtung und den Fortlaufsinn der gezeichneten Linien hat, und daß die Zahlwerte von $\mathfrak{H}$ in zwei verschiedenen Feldpunkten sich verhalten, wie die Zahlen der Linien, die durch eine zur**

Feldrichtung senkrecht stehende Flächeneinheit in den beiden Punkten hindurchtreten.

Willkürlich war die Zahl z der Bündel, die von N ausgehen, und damit auch die Zahl der gezeichneten $\mathfrak{H}$-Linien. Es soll nun z so gewählt werden, daß die Zahl von Linien, die durch eine zur Feldrichtung senkrecht stehende Flächeneinheit hindurchtreten, gleich ist dem Zahlwerte von $\mathfrak{H}$ am Orte der Flächeneinheit.

Nach dem Coulomb schen Gesetz ist die magnetische Feldstärke auf der Kugelfläche 1, wenn die Stärke des Poles N, bestimmt auf Grund der in 1c gegebenen Definition, mit $\mathfrak{m}$ bezeichnet wird, und l eine Größe ist, die von $\mathfrak{m}$ und r_1 nicht abhängt,

$$H = l \cdot \frac{\mathfrak{m}}{r_1^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)$$

Der Faktor l hängt nur von den Maßeinheiten ab, in denen die Größen auf beiden Seiten des Gleichheitszeichens gemessen werden. Es sollen also durch die Flächeneinheit der Kugel 1 hindurchtreten

$$z_1 = H = \frac{l \cdot \mathfrak{m}}{r_1^2}$$

gezeichnete $\mathfrak{H}$-Linien, oder durch die ganze Kugelfläche

$$z = z_1 \cdot 4 \pi r_1^2$$
$$= 4 \pi l \cdot \mathfrak{m} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Linien.

D. h. von einem Pole der nach 1c definierten und gemessenen Stärke $\mathfrak{m}$ aus sind $4\pi l.\mathfrak{m}$ $\mathfrak{H}$-Linien zu ziehen.

Im absoluten Maßsystem ist $l = 1$.[1])

Somit ist zunächst für das Feld eines einzelnen Poles eine Art von Landkarte — soweit es sich um Darstellungen in einer Ebene handelt — gewonnen, aus der Richtung und Größe von $\mathfrak{H}$ abzulesen ist. Die Genauigkeit der Ablesung hängt auch hier vom „Maßstabe" ab, d. h. man kann statt der z Linien, die von einem Pole aus zu ziehen sind, und die oft in so großen Abständen voneinander verlaufen, daß eine Ermittelung des Wertes von $\mathfrak{H}$ durch eine in das Liniensystem hineingehaltene Flächeneinheit gar nicht praktisch ausführbar ist, auch die doppelte, dreifache usw. Zahl von Linien ziehen, muß dann aber immer den gewählten Maßstab angeben. Umgekehrt ist es in zu starken Feldern nicht möglich, alle Linien einzuzeichnen.

2e) Zerlegung von $\mathfrak{H}$ in Komponenten. Die Feldstärke $\mathfrak{H}$ läßt sich wie jede Kraft in Komponenten zerlegen. Sei P ein Punkt des Feldes (Fig. 7), und der Pfeil $\mathfrak{H}$ stelle nach Richtung und Größe die Feldstärke dar. Es gehen also durch eine senkrecht zur Feldrichtung gestellte Flächeneinheit f nach 2d so viele $\mathfrak{H}$-Linien hindurch, als der Zahlwert von $\mathfrak{H}$ — der mit H bezeichnet werde — im Punkte P beträgt. Ist nun l eine beliebige von P ausgehende Richtung, die mit der Richtung von $\mathfrak{H}$ den Winkel α bildet, so ist die Komponente $\mathfrak{H}_l$ von $\mathfrak{H}$ nach der Richtung l

$$\mathfrak{H}_l = H \cdot \cos \alpha.^{1)} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Legt man durch P eine zweite Flächeneinheit f′ senkrecht zu l, so gehen durch diese nicht mehr alle $\mathfrak{H}$-Linien hindurch, die f durchsetzen, sondern nur die, die auch durch die senkrechte

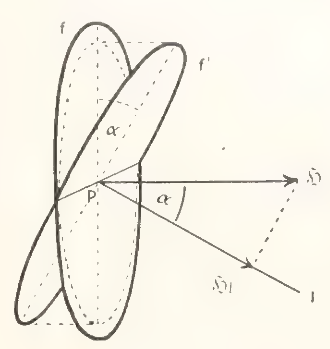


Fig. 7.

Projektion von f′ auf f hindurchgehen. Die Größe dieser Projektion (in der Figur punktiert) ist nach bekannter Regel gleich

$$f' \cdot \cos \alpha.$$

Es treten also durch sie hindurch

$$H \cdot f' \cdot \cos \alpha = H \cdot \cos \alpha$$

$\mathfrak{H}$-Linien, weil $f' = 1$; also gerade soviel, als die Komponente von $\mathfrak{H}$ nach der Richtung l beträgt.

Das $\mathfrak{H}$-Linienbild gestattet daher auch, für jeden Feldpunkt P die Komponente der Feldstärke nach einer beliebigen Richtung l abzulesen: man lege durch P eine Flächeneinheit senkrecht zu l und zähle die hindurchtretenden $\mathfrak{H}$-Linien. Die Zahl[2]) gibt die Größe der Komponente von $\mathfrak{H}$ nach der Richtung l an.

2f) Zusammensetzung von $\mathfrak{H}$-Linienbildern. Umgekehrt lassen sich zwei Felder zu einem resultierenden zusammensetzen.

Für die Vektordarstellung geschieht dies nach dem bekannten Satz vom Parallelogramm der Kräfte. Es seien also zwei Felder gleichzeitig vorhanden, so daß im Punkt P (Fig. 8) der Pfeil $\mathfrak{H}_1$ nach Richtung und Größe die eine Feldstärke, der Pfeil $\mathfrak{H}_2$ ebenso die des anderen Feldes angibt. Richtung und Stärke des resultierenden Feldes ist dann durch den Pfeil $\mathfrak{H}$ gegeben.

[1]) Die Zahl z in absolutem Maß gibt die Polstärke in „Maxwell".

[1]) Die Komponente $\mathfrak{H}_l$ wird negativ, wenn die Richtung des Strahles l mit $\mathfrak{H}$ einen stumpfen Winkel bildet, weil der cos für Winkel zwischen 90° und 180° negativ ist.

[2]) Nach Anmerkung 1 ist der Zahl, um mit ihr mathematisch operieren zu können, noch ein Vorzeichen zu geben, und zwar das positive oder negative, je nachdem die $\mathfrak{H}$-Linien nach der Seite der Strahlrichtung l oder nach der entgegengesetzten durch die Flächeneinheit hindurchlaufen.

Liegen dagegen die $\mathfrak{H}$-Linienbilder der beiden Felder vor, so erhält man das Linienbild des resultierenden Feldes folgendermaßen.

In Figur 9 seien 1 1 und 2 2 2 Linien der beiden Felder.[1])

Die Linien des Feldes 1 laufen an der betrachteten Stelle im Abstande d_1 voneinander, die des Feldes 2 im Abstande d_2. Es treten nun durch eine zum Feld senkrechte Flächen-, oder Längeneinheit der ebenen Figur um so mehr Linien hindurch, je dichter die Linien beieinander liegen, d. h. die Stärken der beiden Felder im Punkte A stehen in dem Verhältnis

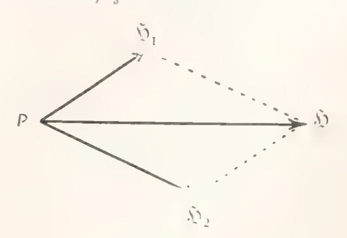


Fig. 8.

$$H_1 : H_2 = d_2 : d_1.$$

Andererseits stehen d_2 und d_1 wegen der Aehnlichkeit der beiden rechtwinkeligen Dreiecke A B G und D A H (die Winkel α sind gleich) in dem Verhältnis

$$d_2 : d_1 = A B : A D,$$

also

$$H_1 : H_2 = A B : A D.$$

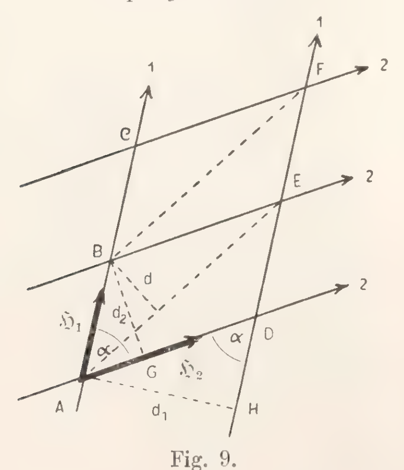


Fig. 9.

D. h. aber nach Figur 8, daß das Parallelogramm, mittels dessen das resultierende Feld $\mathfrak{H}$ aus $\mathfrak{H}_1$ und $\mathfrak{H}_2$ gefunden wird, ähnlich ist dem Parallelogramm A B E D. Mit anderen Worten, die Richtung von $\mathfrak{H}$ fällt mit der Diagonale A E zusammen.

[1]) Sie sind als parallele Linien gezeichnet, was man auch bei den divergierenden Linien eines einzelnen Poles tun darf, sobald man nur die Linien dicht genug (s. 2 d am Schluß) in das Feld eingezeichnet hat und nur sehr kurze Stücke davon betrachtet.

Auch die Stärke des resultierenden Feldes $\mathfrak{H}$ wird durch den Abstand d der Linien A E und B F richtig dargestellt sein, wenn d zu d_2 in dem Verhältnis steht

$$d : d_2 = H_2 : H.$$

Dies aber folgt aus der Flächengleichheit der beiden Parallelogramme A B E D und A B F E. Es ist

$$A D . d_2 = A E . d$$

oder

$$d : d_2 = A D : A E = H_2 : H$$

nach dem vorhin Bewiesenen.

Um also aus den Linienbildern zweier gleichzeitig vorhandener Felder das des resultierenden zu finden, ziehe man in den Parallelogrammen, die bei genügender Liniendichte infolge der gegenseitigen Durchkreuzung der beiden Liniensysteme entstehen, die Diagonalen. Diese setzen das gesuchte Bild zusammen.

2 g) Erhaltung des $\mathfrak{H}$-Linienflusses im Felde eines einzelnen Poles und Uebertragung auf beliebige Felder. Gleichförmiges Feld. Verfolgt man ein Bündel von $\mathfrak{H}$-Linien, das von einem einzelnen Pole ausgeht, so wächst dessen Querschnitt q mit dem Quadrate des Abstandes r vom Pole, der Betrag der Feldstärke $\mathfrak{H}$ aber nimmt mit dem Quadrate des Abstandes ab, also

$$q = c_1 . r^2 \qquad H = \frac{c_2}{r^2},$$

wenn c_1 und c_2 Größen bezeichnen, deren Wert von der Polstärke und der Wahl des Bündels, sowie vom Maßsystem abhängt. Daher folgt

$$H . q = c,$$

d. h. die Gesamtzahl der durch einen Querschnitt q des Bündels hindurchgehenden $\mathfrak{H}$-Linien ist an allen Stellen des Bündels dieselbe, oder wie man sagt: der Kraftfluß oder $\mathfrak{H}$-Linienfluß bleibt längs de ganzen Bündels erhalten.

Was hier und in **2** d für das einfache Feld eines Poles nachgewiesen wurde, gilt allgemein für beliebige Felder. Alle Felder, die nicht von Strömen herrühren, lassen sich, wie in **6** e und im Artikel „Magnetische Influenz" näher besprochen wird, zusammensetzen aus den Feldern einzelner Pole, und alle Stromfelder lassen sich nach **5** a und b und Artikel „Magnetische Influenz" **5** a ebenfalls auf Polverteilungen besonderer Art zurückführen. Aus der Regel für die Zusammensetzung der Feldbilder einzelner Pole zu dem Bilde des resultierenden Feldes (**2** f) geht also hervor, daß auch beliebige Felder sich durch $\mathfrak{H}$-Linien nach Richtung und Stärke darstellen lassen, derart, daß die Linien das Feld als kontinuierlich fortlaufende Fäden durchziehen und sich in

Bündel abteilen lassen, für die der Satz von der Erhaltung des $\mathfrak{H}$-Linienflusses gilt, solange das Bündel auf keine Pole — und wie in 6e gezeigt wird, keine Grenzfläche zwischen verschiedenen Medien — trifft.[1]) Ueber die Verhältnisse an den Polen vgl. 6e und den Artikel „Magnetische Influenz" unter 2.

Im Felde eines Stabmagneten z. B. (Fig. 4) „laufen" die $\mathfrak{H}$-Linien — in dem in 2a definierten Sinne des Wortes — vom Nordende zum Südende hin; das Aufhören vieler der Linien im Felde ist nur scheinbar, mit empfindlicheren Hilfsmitteln als es die Feilspäne sind, lassen sich auch diese Linien vom Nord- bis zum Südende verfolgen. Denkt man sich die Gesamtheit der Linien in Bündel oder — wenn man nur die das Bündel begrenzenden Linien ins Auge faßt — Röhren zerlegt, so hat jedes Bündel seinen kleinsten Querschnitt da, wo es vom Stabe ausgeht, bezw. wieder auf ihn trifft, es erweitert sich dazwischen bis zu einem Maximum von Dicke, das etwa in der Mitte der vom Bündel durchlaufenen Bahn erreicht wird. Die Gesamtzahl der im Bündel oder in der Röhre verlaufenden $\mathfrak{H}$-Linien ist längs des ganzen Bündels dieselbe und an einer Stelle vom Querschnitt q gleich H.q, wo H entweder, wenn der Querschnitt q so klein ist, daß die Feldstärke in allen seinen Punkten nicht merklich verschieden ist, diese Feldstärke bezeichnet, oder bei größerem q den Mittelwert von allen auf q vorhandenen Werten. Für die Feldstärken H_1 und H_2 an zwei Stellen des Bündels vom Querschnitt q_1 und q_2 gilt daher

$$H_1 : H_2 = q_2 : q_1$$

so daß aus den Querschnittsänderungen der Bündel die Aenderungen von H unmittelbar zu ersehen sind.

Ein Feld von überall gleicher Stärke und Richtung heißt gleichförmig. Die darstellenden $\mathfrak{H}$-Linien sind hier parallele Gerade von gleichem Abstande. Die Gleichförmigkeit kann auch nur in einzelnen Teilen des Feldes bestehen, wie Figur 10, das Feld zweier entgegengesetzter Magnetpole, in seinem mittleren Teile erkennen läßt. Auch das Erdfeld ist über mehr oder weniger ausgedehnte Gebiete gleichförmig. In Deutschland gehen dabei im Durchschnitt etwa 0,46 $\mathfrak{H}$-Linien (bei absoluter Messung) durch das Quadratzentimeter.

Jedes Feld ist innerhalb hinreichend kleiner Gebiete, deren Größe mit der Entfernung von den Feldquellen wächst, als nahezu gleichförmig zu betrachten, wie die Anschauung unmittelbar lehrt.

3. Allgemeine Gesetze des statischen Feldes. 3a) Statische und elektromagnetische Felder. Zwischen den Feldern der sogenannten „permanenten" Magnete und den Feldern elektrischer Ströme, oder wie man kurz sagt, den statischen und elektromagnetischen Feldern ist ein wesentlicher Unterschied vorhanden.

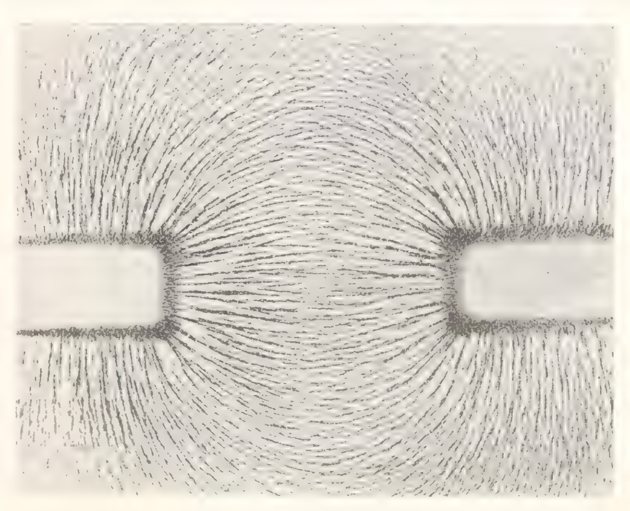


Fig. 10.

Das statische Feld besteht ohne Energieverbrauch; zur Erhaltung des elektromagnetischen wird dauernd elektrische Energie aus Stromquellen entnommen und in den stromdurchflossenen Leitern in andere Energieformen verwandelt.

3b) Niveau- oder Aequipotentialflächen. Es liege etwa das Feld eines Stabmagneten vor. In Figur 11 seien A B und D C zwei Stücke von $\mathfrak{H}$-Linien mit dem durch die Pfeile angedeuteten Fortlaufsinne (vgl. 2a). D. h. ein einzelner frei beweglicher Nordpol würde, nach A gebracht, unter der Einwirkung der magnetischen Kräfte die Bahn A B durchlaufen. Dabei leisten die magnetischen Kräfte Arbeit. Ist die magnetische Feldstärke längs des ganzen Weges A B unveränderlich, gleich H, so ist die Arbeit nach bekanntem Satze der Mechanik einfach

$$\text{Kraft } H \times \text{Weglänge } A\,B.$$

Andernfalls läßt sich der Weg in so kurze Stücke zerlegen, daß längs jedes Stückes die Feldstärke sich nur ganz verschwindend wenig ändert und als konstant betrachtet werden kann. Sind $l_1, l_2, l_3 \ldots$ die Längen der Stücke und $H_1, H_2, H_3 \ldots$ die entsprechenden Werte der Feldstärke, so wird die Arbeit gleich der Summe

$$H_1 . l_1 + H_2 . l_2 + H_3 . l_3 + \ldots$$

Wird der Nordpol, in B angekommen, auf demselben Wege nach A zurückgeführt, so ist dieselbe Arbeit jetzt gegen

[1]) Die absolute Einheit des $\mathfrak{H}$-Linienflusses heißt „Maxwell" (vgl. 2d, Anm. [1])).

die magnetische Kraft zu leisten, die vorher von ihr geleistet wurde.

Es mögen jetzt durch A und B Flächen so gelegt werden, daß sie überall senkrecht von den $\mathfrak{H}$-Linien durchsetzt werden — sie schneiden die Ebene der Figur 11 in den Linien A D und B C. Man nennt solche die $\mathfrak{H}$-Linien unter rechtem Winkel durchschneidende Flächen Niveauflächen oder (s. 3c) Aequipotentialflächen. Im Felde eines Stabmagneten sind es Flächen, die an der Oberfläche des Magneten ansetzen und mehr oder weniger kugelförmig je einen der Pole umhüllen, wie ein Blick auf Figur 4 übersehen läßt. Verschiebt sich der Nordpol längs einer Linie, die in einer Niveaufläche verläuft — einer sogenannten Niveau- oder Aequipotentiallinie — so wird dabei weder von der magnetischen Kraft noch gegen dieselbe Arbeit geleistet, weil die Komponente der Kraft $\mathfrak{H}$ nach der jeweiligen Bewegungsrichtung des Poles Null ist. Das Entsprechende im Schwerefeld der Erde sind die Horizontalflächen und Horizontallinien. Bei Bewegungen eines Körpers auf ihnen wird keine Arbeit von der Schwerkraft oder gegen sie geleistet. Es ist also mit der Bewegung des Poles längs der Niveaulinien B C und A D keinerlei Arbeitsleistung verknüpft. Schiebt man aber den Pol entgegen der magnetischen Kraft von C nach D, so ist dazu ein Arbeitsaufwand erforderlich von demselben Betrage wie auf dem Wege B A.

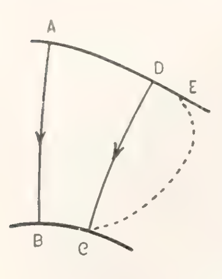


Fig. 11.

Denn wäre dies nicht der Fall, wäre z. B. die auf dem Wege B A zu leistende Arbeit — und damit auch die von den Feldkräften auf dem Wege A B geleistete — größer, dann wäre entgegen dem Energieprinzip Arbeitsleistung zu gewinnen, ohne daß ein gleich großer Betrag irgendwelcher anderer Energie dafür verschwände. Man brauchte nur den Pol von A nach B wandern zu lassen — die dabei von der Feldstärke geleistete Arbeit könnte etwa durch Spannung einer Spiralfeder aufgespeichert werden — und dann über C und D nach A zurückzuführen. Die Feder würde sich dann, während sie den Pol von C nach D schiebt, wegen der geringeren Arbeitsleistung auf dem Wege C D nicht vollständig entspannen, es würde also Energie in Form elastischer Spannung gewonnen sein, während im ganzen Felde sonst durchaus nichts geschehen, und keinerlei Veränderung wahrzunehmen ist, nachdem der Pol wieder in A angekommen. Aus demselben Grunde kann die auf dem Wege B A zu leistende Arbeit auch nicht kleiner sein, als die auf dem Wege C D, beide Arbeitsbeträge müssen vielmehr gleich sein.

Derselbe Beweis läßt sich auf den Fall anwenden, daß der Pol nicht längs der $\mathfrak{H}$-Linie C D von der einen zur anderen Niveaufläche übergeführt wird, sondern längs einer beliebigen Linie, z. B. CE. Hier wirkt im allgemeinen nicht die volle Feldstärke der Bewegung entgegen, sondern nur eine längs des Weges veränderliche Komponente, dafür aber ist der Weg entsprechend länger, so daß dieselbe Arbeit herauskommt, wie auf C D.

Zu den in 2 b ausgesprochenen Gesetzen kommt also das folgende:

3. Die mit der Bewegung eines Poles von einer Niveaufläche zur anderen verbundene Arbeitsleistung ist unabhängig von der Lage der Endpunkte der Bahn auf den beiden Flächen und von der Gestalt der Bahn.

Oder in anderer Form:

Wird ein Pol von einem Punkte A des Feldes auf beliebiger Bahn wieder nach A zurückgeführt, so ist am Schluß gerade so viel Arbeit von den Feldkräften geleistet worden, wie gegen sie.

3c) Potentialdifferenz und Potential. Durch die Niveauflächen zerfällt der Feldraum in eine Anzahl von Lamellen oder Schalen, derart daß jeder solchen Lamelle ein bestimmter Arbeitsbetrag entspricht, der bei ihrer Durchschreitung durch einen Einheitsnordpol zu leisten oder zu gewinnen ist.

Seien zwei beliebige Niveauflächen mit 1 und 2 bezeichnet. Man nennt dann die Arbeit, die mit der Ueberführung eines Einheitsnordpoles von Fläche 1 nach 2 verbunden ist, die Potentialdifferenz zwischen den Flächen 1 und 2, oder auch zwischen dem Anfangs- und Endpunkte der Bahn des Einheitsnordpoles. Ist die Arbeit gewonnene, also von den magnetischen Kräften geleistete, so gibt man der Differenz das positive Zeichen, sagt also, die Fläche 1 hat höheres Potential als 2.

Da die Bewegung des Poles auf jeder Niveaufläche ohne Arbeitsgewinn oder -verbrauch erfolgt, so ist die Potentialdifferenz zwischen allen Punkten einer Niveaufläche gleich null, oder alle Punkte einer Niveaufläche haben gleiches Potential (daher der Name Aequipotentialfläche). Die Arbeit, die mit der Beförderung des Einheitsnordpoles von einem Feldpunkte P nach einer Stelle außerhalb des Feldes verbunden ist, heißt das Potential des Punktes P. Es erhält das positive Zeichen, wenn die Arbeit gewonnene, d. h. von den magnetischen Kräften geleistete ist, andernfalls das negative Zeichen.

3d) *Feldstärke und Potentialgefälle.* Es sei (Fig. 12) P ein Punkt einer Niveaufläche v. Das Potential nehme nach unten zu ab, die Feldstärke sei also nach Größe und Richtung durch den Pfeil $\mathfrak{H}$, senkrecht zu v, dargestellt. Um P werde

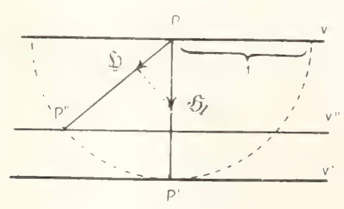


Fig. 12.

eine Kugel vom Radius 1 geschlagen. Die Längeneinheit sei aber so klein gewählt, daß innerhalb der Kugel das Feld seine Stärke und Richtung nicht merklich ändert. Geht man von P aus in der Richtung der verschiedenen Kugelradien bis zur Kugeloberfläche, z. B. von P nach P'', so gelangt man zu Niveauflächen, z. B. v'', deren Potential sich von dem des Punktes P um verschiedene Beträge unterscheidet. Man nennt die Potentialabnahme auf der Längeneinheit des Weges in einer bestimmten Richtung das *Potentialgefälle* nach dieser Richtung. Da man nun auf jedem der Kugelradien, außer PP', zu Niveauflächen gelangt, die näher an v liegen und daher höheres Potential haben als v', so gilt der Satz:

4. *Die Feldstärke $\mathfrak{H}$ hat in jedem Punkte die Richtung des stärksten Potentialgefälles.*

Ferner ist die Arbeit der magnetischen Kraft bei der Bewegung eines Einheitsnordpoles von P nach P' gleich

H.PP' = Potentialdifferenz zwischen P und P'[1]), oder da PP' = 1, so gilt:

5. *Die Feldstärke $\mathfrak{H}$ hat in jedem Punkte die Größe des stärksten Potentialgefälles.*

Ebenso folgt für den Weg PP'' eines Einheitsnordpoles, wenn $\mathfrak{H}_1$ die Komponente von $\mathfrak{H}$ nach der Richtung PP'' bezeichnet:

$\mathfrak{H}_1$. PP'' = Potentialdifferenz zwischen P und P''

oder, da wieder PP'' = 1, der Satz:

6. *Die Komponente $\mathfrak{H}_1$ von $\mathfrak{H}$ nach irgend einer Richtung l ist gleich dem Potentialgefälle nach dieser Richtung.*

[1]) Dies gilt eben nur, wenn der Kugelradius so klein genommen wird, daß er auf seine ganze Länge mit der Richtung von $\mathfrak{H}$ zusammenfällt, und $\mathfrak{H}$ seine Größe von P bis P' nicht merklich ändert.

3e) *Potentialdarstellung des Feldes.* Durch jeden Punkt des Feldes geht nur *eine einzige* Niveaufläche, d. h. jedem Punkte kommt nur ein einziger bestimmter Potentialwert zu; denn gingen 2 oder mehr Flächen hindurch, so gäbe es auch mehr als eine Richtung der Feldstärke $\mathfrak{H}$ in dem Punkte (s. 2 b).

Die Einführung des Potentialbegriffs ermöglicht eine Feldbeschreibung in der Weise, daß man jedem Feldpunkte eine bestimmte Zahl zuweist, so daß die Differenz der Zahlen zweier Punkte gleich der Potentialdifferenz der beiden Punkte ist. Diese Zahlenverteilung ist auf Grund der Sätze 4 bis 6 ein vollständiger Ersatz für die Vektordarstellung des Feldes (s. 1 e).

3f) *Uebergang der $\mathfrak{H}$-Linien aus einem Medium in ein anderes.* Mit der Magnetnadel ist die Verfolgung der $\mathfrak{H}$-Linien nur im Luftraum und in Flüssigkeiten möglich. Ueber ihren Verlauf in den Magneten und anderen festen Körpern gibt eine in 6 b zu besprechende Methode eine gewisse Auskunft. Vorerst läßt sich aus den allgemeinen Gesetzen des Feldes nur eine Bedingung ableiten, der der Linienverlauf an der Grenze zweier verschiedener Körper zu genügen hat.

In Figur 13 stelle SS einen Schnitt durch die Grenzfläche zwischen zwei verschiedenen Körpern, etwa Luft und Eisen dar. A B C D sei ein Rechteck, dessen Seiten A B und C D unmittelbar unter- und oberhalb der Grenzfläche parallel zu dieser laufen, während die sehr kurzen Seiten A D und B C senkrecht auf SS stehen. Es werde ein

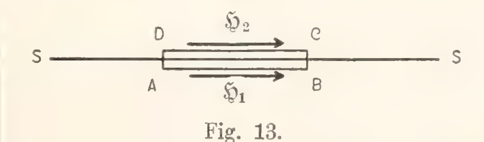


Fig. 13.

Einheitsnordpol rund um das Rechteck, etwa von A aus, herumgeführt.[1]) Die Arbeit auf den Wegstücken A D und B C wird verschwindend klein, wenn man die Strecken A B und C D unmittelbar an die Grenzfläche heranlegt; in Betracht kommt nur die Arbeit auf diesen Strecken A B und C D. Die Komponenten der Feldstärke nach A B und C D seien $\mathfrak{H}_1$ und $\mathfrak{H}_2$, und die Strecken seien nur so lang, daß die Komponenten sich längs derselben nicht merklich ändern. Nach Satz 3 (s. 3 b) muß die beim Umlauf des Einheitspoles *von* den magnetischen Kräften geleistete Arbeit gerade so groß sein wie

[1]) Innerhalb des Eisens ist diese Bewegung natürlich nur *gedacht* (vgl. den Artikel „*Magnetische Influenz*" unter 3 f).

die gegen sie geleistete. Dies ist aber nur möglich, wenn $\mathfrak{H}_1$ gerade so groß wie $\mathfrak{H}_2$ und gleich gerichtet ist. Es gilt also der Satz:

7. Der Uebergang der $\mathfrak{H}$-Linien von einem Medium zum anderen kann nur so erfolgen, daß die Projektionen der Feldstärke $\mathfrak{H}$ auf die — innerhalb eines kleinen Bezirks immer als eben zu betrachtende — Grenzfläche, die sogenannten Tangentialkomponenten von $\mathfrak{H}$, zu beiden Seiten der Grenzfläche gleiche Größe und Richtung haben.

Der Beweis des Satzes 3 gründete sich auf die Tatsache, daß nach Vollendung des vollständigen Polumlaufs keinerlei Veränderung im ganzen Felde wahrzunehmen ist; die Uebertragung des Satzes auf den nur gedachten Umlauf durch das Eisen hindurch rechtfertigt sich dadurch, daß die aus 7 zu ziehenden Folgerungen nirgends mit der Erfahrung in Widerspruch sind.

4. Das Superpositionsprinzip und seine Anwendungen. 4a) Das Superpositionsprinzip für den Fall der magnetischen Gleichartigkeit aller Körper. Eine der wesentlichsten Grundlagen für die Berechnung magnetischer Felder bildet das sogenannte Superpositionsprinzip. Es gibt Antwort auf die Frage: was geschieht mit den Feldern einzelner Magnete oder Ströme, wenn man diese Magnete und Ströme in beliebiger Weise nebeneinander anordnet; insbesondere wann lagern sich die Einzelfelder unverändert übereinander?

Das Superpositionsprinzip läßt sich nur dann in einfacher Form aussprechen, wenn die materielle Beschaffenheit aller im Feldraume befindlicher Körper in magnetischer Beziehung völlig gleich und unveränderlich ist (s. 6d). Da dies in Strenge niemals zutrifft, so gilt die einfache Form des Superpositionsprinzips nur in einem Idealfalle, dem aber viele der praktisch vorkommenden Fälle hinreichend nahe kommen, um das Prinzip in dieser Form anwenden zu können.

Es werde also vorausgesetzt, daß alle im Felde befindlichen Körper, einschließlich der Stahlmagnete, in magnetischer Hinsicht völlig gleichartig und unveränderlich sind. Dann lautet das Superpositionsprinzip:

Entspricht einer Anordnung von Magneten und Strömen ein Feld $\mathfrak{H}_1$, einer zweiten Anordnung ein Feld $\mathfrak{H}_2$, so entspricht dem gleichzeitigen Vorhandensein beider Anordnungen ein Feld, das durch Uebereinanderlagerung und Zusammensetzung der beiden unveränderten Einzelfelder erhalten wird; d. h. man zeichne das $\mathfrak{H}$-Linienbild des ersten Feldes, darüber das des zweiten so, als ob $\mathfrak{H}_1$ nicht vorhanden wäre, und konstruiere nach der in 2f gegebenen Regel das resultierende Linienbild.

4b) Magnetisches Moment. Magnetisierung und $\mathfrak{J}$-Linien. Es handle sich z. B. — unter der Voraussetzung der magnetischen Gleichartigkeit aller im Felde befindlichen Körper — um das Feld eines beliebig gestalteten Stahlmagneten. Seine Wirkung auf sehr große Entfernung[1]), und auch die Wirkung auf ihn selber aus sehr großer Ferne, d. h. in einem gleichförmigen Felde (s. 2g am Schluß), läßt sich darstellen auf Grund des Coulombschen Gesetzes durch eine Größe, die das magnetische Moment des Magneten heißt.

Fig. 14.

Man denkt sich in dem Magneten eine Verteilung magnetischer Mengen derart, daß die Endpunkte bestimmt gerichteter paralleler Strecken (Fig. 14) mit paarweise gleich großen nord- und südmagnetischen Mengen N und S belegt sind. Für die Wirkung in sehr große Ferne kommt es nur auf das Produkt aus der einzelnen Menge $\mathfrak{m}$ und der zugehörigen Strecke l an, also auf die Größe $\mathfrak{m} . l$. Unter dem Momente $\mathfrak{M}$ des Magneten versteht man die Summe aller dieser Produkte

$$\mathfrak{M} = \mathfrak{m}_1 l_1 + \mathfrak{m}_2 l_2 + \dots$$

Die Richtung von l und zwar behaftet mit einem bestimmten Weisungssinne, vom Südpol nach dem Nordpol hin, heißt die Richtung der magnetischen Achse des Magneten.

Bezeichnet r den Abstand eines sehr fernen Punktes P vom Magneten, ϑ den Winkel, den r mit der Richtung der magnetischen Achse bildet, so ist das Potential V in P gegeben durch

$$V = l . \frac{\mathfrak{M} . \cos \vartheta}{r^2}, \quad \dots\dots\dots \quad 4)$$

wo die Konstante l mit der des Coulombschen Gesetzes in 2d identisch ist. Das Feld des Magneten ist also berechenbar, sobald man die Größe seines magnetischen Momentes und die Richtung der magnetischen Achse kennt.

Das Moment $\mathfrak{M}$ ändert sich nicht, wenn man die Strecken l verkürzt oder verlängert, ihre Abstände ändert, neue Strecken anlegt und nur die magnetischen Mengen in den Endpunkten entsprechend verändert. Man kann also z. B. bei einem parallelepipedischen Magneten annehmen, daß über zwei gegenüberliegende Begrenzungsflächen nord- und südmagnetische Mengen gleichmäßig verteilt, also alle l gleich lang sind.

Rückt nun der Punkt P für den das Potential oder die Feldstärke zu berechnen ist näher an den Magneten M (Fig. 15) heran, so genügt für die Berechnung das Moment nicht mehr. In diesem Falle aber denke man sich den Magneten in so kleine Teile (Volumelemente) zerlegt daß gegen jeden dieser Teile die Entfernung des Punktes P groß wird. Jedem Volumelemente läßt sich ein magnetisches Moment zuschreiben, da sich er-

[1]) D. h. auf eine Entfernung, die sehr groß ist gegenüber den Abmessungen des Magneten.

fahrungsgemäß jeder noch so kleine Teil eines Magneten, von diesem losgelöst, als Magnet mit zwei Polen erweist. Die Gesamtwirkung des ganzen Magneten M setzt sich aus den nach Gleichung (4) zu berechnenden Einzelwirkungen der Volumelemente nach dem Superpositionsprinzip zusammen. Je näher der Punkt P an den Magneten heranrückt, um so kleiner müssen die Volumteile gewählt werden, um die Kraftwirkung richtig zu erhalten; schließlich, wenn P ganz dicht an den Magneten oder gar zwischen die Moleküle desselben rückt, reduzieren sich die Volumelemente auf molekulare Dimensionen. Es ist dann mit den Momenten der Moleküle zu rechnen. Je nach der verlangten Genauigkeit der Berechnung und der Entfernung des Punktes P müssen also die magnetischen Momente größerer oder kleinerer Volumteile bekannt sein um daraus die magnetischen Wirkungen in P zu finden.

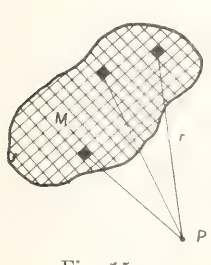


Fig. 15.

Das magnetische Moment einer beliebigen Volumeinheit bezeichnet man als Magnetisierung. Hier werde dafür das Zeichen $\mathfrak{J}$ gebraucht. Um demnach den Magneten in bezug auf seine Wirkungen hinreichend zu kennzeichnen, sind zweierlei Angaben erforderlich: die Angabe der magnetischen Momente hinreichend kleiner Volumeinheiten und die Andeutung der Richtung der magnetischen Achse für jede Volumeinheit. Beide Angaben sind nach 1e, 2a und 2d ersetzbar durch die Vektordarstellung der Magnetisierung $\mathfrak{J}$ oder durch Zeichnung von Magnetisierungslinien oder $\mathfrak{J}$-Linien, die aus Richtung und Dichte die Richtung der magnetischen Achse und die Größe des magnetischen Momentes der Volumeinheit an jeder Stelle des Magneten unmittelbar übersehen lassen. Und zwar sollen durch jede senkrecht zu den $\mathfrak{J}$-Linien gestellte Flächeneinheit so viel $\mathfrak{J}$-Linien hindurchgehen als der Zahlwert von $\mathfrak{J}$ am Orte der Flächeneinheit angibt.[1])

4c) $\mathfrak{J}$-Linien und magnetische Mengen. Die $\mathfrak{J}$-Linien stehen in bestimmter Beziehung zu den in 1c definierten magnetischen Mengen m.

Ist ein Magnet so magnetisiert, daß alle $\mathfrak{J}$-Linien parallel und in gleichem Abstande laufen, so heißt die Magnetisierung gleichförmig. Man denke sich in diesem Falle die Volumeinheiten als kleine Würfel, mit zwei ihrer Flächen senkrecht zu den $\mathfrak{J}$-Linien (Fig. 16) und mit gleichmäßig verteilten magnetischen Mengen auf diesen Flächen. Da alle Würfel dasselbe magnetische Moment haben, so kommen in jeder Berührungsfläche BB gleichgroße nord- und südmagnetische Mengen zusammen zu liegen. Eine Wirkung in die Ferne geht von diesen Flächen nicht aus.

Ist die Magnetisierung ungleichförmig, so kann man nach 2g (am Schluß) innerhalb hinreichend kleiner Gebiete doch $\mathfrak{J}$ als gleichförmig betrachten, also auch die Würfel so klein annehmen, daß die magnetischen Momente zweier aufeinanderfolgender sich nicht merklich unterscheiden, d. h. in der Berührungsfläche BB keine nach außen wirkenden magnetischen Mengen auftreten.

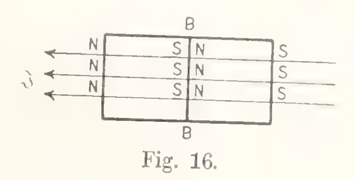


Fig. 16.

Hat aber eine $\mathfrak{J}$-Linie irgendwo einen Endpunkt, dann kann man die beiden Würfel, deren Berührungsfläche BB durch diesen Endpunkt geht, noch so klein annehmen, sie werden immer verschieden große magnetische Momente besitzen, d. h. in der Berührungsfläche werden die magnetischen Mengen des einen Würfels über die des anderen überwiegen. Die $\mathfrak{J}$-Linien laufen vom Südpol zum Nordpol eines Magneten; wenn also in BB (s. Fig. 16) eine $\mathfrak{J}$-Linie entspringt, so ist das magnetische Moment des linken Würfels um eine Einheit größer als das des rechten und es übertrifft die an BB liegende südmagnetische Menge die nordmagnetische ebenfalls um eine Einheit. Wenn umgekehrt in BB eine $\mathfrak{J}$-Linie mündet, d. h. aufhört, so ist das Moment des rechten Würfels und seine an BB liegende nordmagnetische Menge um eine Einheit größer. Es gilt daher der Satz:

Im Ursprungspunkt jeder $\mathfrak{J}$-Linie liegt die südmagnetische Menge 1, im Mündungspunkt die nordmagnetische Menge 1.

Da von Stellen, an denen keine $\mathfrak{J}$-Linien endigen, keine magnetische Wirkung ausgeht, so ist der Verlauf der $\mathfrak{J}$-Linien für das Feld und seine Erscheinungen ganz gleichgültig, nur die Endpunkte sind bestimmend. Jeder Magnet ist also ohne Feldänderung ersetzbar durch einen beliebig anders magnetisierten mit denselben Endpunkten der $\mathfrak{J}$-Linien.

4d) Solenoidale Magnetisierung. Ist die Magnetisierung derartig, daß alle $\mathfrak{J}$-Linien nur an der Oberfläche des Magneten Endpunkte haben, so kann man ihn in eine Anzahl von Stäben zerlegt denken, deren jeder von $\mathfrak{J}$-Linien umgrenzt ist oder das Innere einer Röhre von $\mathfrak{J}$-Linien ausfüllt. Die Gesamtzahl der in jedem solchen Stabe verlaufenden $\mathfrak{J}$-Linien oder der $\mathfrak{J}$-Linienfluß in ihm bleibt über seine ganze Länge trotz beliebiger Krümmungen und Querschnittsänderungen ungeändert. Man nennt eine solche Magnetisierung solenoidal oder röhrenartig; den einzelnen von $\mathfrak{J}$-Linien umschlossenen Stab ein magnetisches Solenoid.

4e) Feld der Doppelschicht. Eine zwar praktisch nicht herstellbare, aber theoretisch wichtige Art der Magnetisierung ist die der sogenannten magnetischen Schale oder Doppelschicht.

Der Magnet bestehe aus äußerst kurzen, mosaikartig angeordneten (vgl. Fig. 17)

[1]) Der Zahlwert von $\mathfrak{J}$ werde mit J bezeichnet.

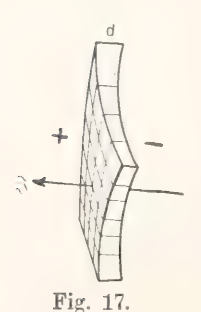


Fig. 17.

Solenoiden (4d). Die $\mathfrak{J}$-Linien sollen sämtlich von der einen Seite der Schale senkrecht zu ihr ausgehen — sie werde kurz als negative Seite bezeichnet — und sämtlich auf der anderen Seite — der positiven — senkrecht auftreffen. Jeder nordmagnetischen Menge auf der positiven Seite entspricht also eine gleichgroße gegenüberliegende südmagnetische auf der negativen Seite. Daher die Bezeichnung Doppelschicht. Die Zahl der auf der Flächeneinheit endenden $\mathfrak{J}$-Linien sei J. Dies ist also auch der Betrag der auf der Flächeneinheit liegenden magnetischen Mengen (4c).

Diese Zahl J kann ihren Wert über die Doppelschicht ändern; es soll sich aber immer die Dicke d der Schicht gleichzeitig im umgekehrten Verhältnis ändern, so daß das Produkt J.d über die ganze Schicht einen unveränderten Wert hat.

Figur 18 stelle einen einzelnen kleinen Magneten der Schicht, einen „Elementarmagneten", wie man ihn als einzelnen Baustein des ganzen Gefüges kurz nennen kann, dar. Seine Endflächen s seien so klein, daß über ihre Ausdehnung die Magnetisierung $\mathfrak{J}$, und damit auch die Schichtdicke d, nicht merklich veränderlich sind. Die magnetische Achse laufe im Sinne des Pfeiles; also entspringen die $\mathfrak{J}$-Linien auf der (negativen) Endfläche hinten und mün-

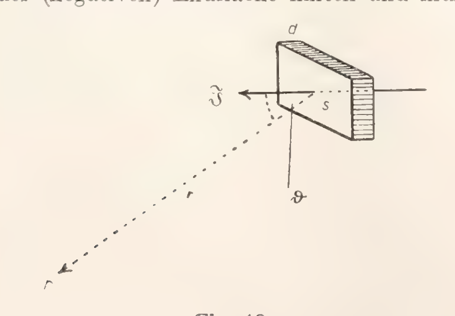


Fig. 18.

den auf der (positiven) Endfläche vorn. Auf der positiven Endfläche befindet sich die nordmagnetische Menge J.s, auf der negativen eine gleich große südmagnetische gleichmäßig verteilt. Das Moment des kleinen Magneten ist also J.s.d. Nach 4b Gleichung (4) ist dann das Potential v im Punkte P, dessen Entfernung r sehr groß ist gegen die Abmessungen des Magneten,

$$v = l.\frac{J.d.s.\cos\vartheta}{r^2}, \quad \ldots \quad 5)$$

wo ϑ der Winkel ist, den die magnetische Achse mit r bildet, und l die Konstante des Coulombschen Gesetzes (s. 2d).

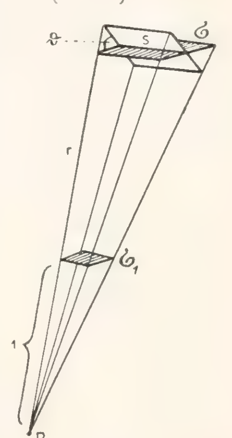


Fig. 19.

Das Feld der ganzen Doppelschicht setzt sich nach dem Superpositionsprinzip aus den Feldern aller dieser kleinen Elementarmagnete zusammen, was in leicht ersichtlicher Weise darauf hinausläuft, daß die Potentiale der Elementarmagnete, d. h. die den Einzelfeldern entsprechenden Arbeitsleistungen (3c), sich addieren.

Die Ausführung der Rechnung wird durch folgende Betrachtung erleichtert. Man denke sich (Fig. 19) um P als Mittelpunkt zwei Kugeln gelegt mit den Radien 1 und r. Zieht man von P aus Strahlen nach allen Punkten der Begrenzungslinie von s, so grenzen diese auf den beiden Kugelflächen Stücke σ_1 und σ ab, die sich nach bekanntem stereometrischem Satze verhalten wie die Quadrate der Kugelradien:

$$\sigma_1 : \sigma = 1 : r^2.$$

Das Stück σ auf der Kugelfläche vom Radius r hat mit um so größerer Annäherung, je größer r im Vergleich zu den Abmessungen von s ist, den Flächeninhalt

$$\sigma = s.\cos\vartheta\,^{1)}.$$

Also hat das Stück σ_1 auf der Kugelfläche vom Radius 1 die Größe

$$\sigma_1 = \frac{\sigma}{r^2} = \frac{s.\cos\vartheta}{r^2} \quad \ldots\ldots \quad 6)$$

Man nennt σ_1 den räumlichen oder körperlichen Winkel, unter dem die Fläche s vom Punkte P aus gesehen erscheint. Dieser körperliche Winkel kann positiv und negativ sein, da er das Vorzeichen von cos ϑ erhält. Er ist positiv, wenn die Richtung der magnetischen Achse mit der Strecke r einen spitzen Winkel bildet, d. h. wenn der kleine Magnet dem in P gedachten Auge seine positive Seite zukehrt, dagegen negativ im umgekehrten Falle. Hat also z. B. die Doppelschicht eine Gestalt, wie sie Figur 20 im Querschnitt andeutet, so erscheinen die drei Elementarmagnete A, B und C von P aus alle unter gleich großem körperlichem Winkel, es hat aber der Winkel für A und C positives, für B negatives Vorzeichen. Addiert man alle drei Winkel, so heben sich die von A und B oder von B und C gegenseitig fort. Man

---

1) σ ist die Zentralprojektion von s auf die Kugelfläche vom Radius r, mit P als Projektionszentrum; s.cos ϑ dagegen die senkrechte Projektion von s auf dieselbe Kugelfläche!

übersieht, daß man bei Addition aller Winkel, unter denen alle einzelnen Elementarmagnete der Schicht von P aus erscheinen, bei Beachtung der Vorzeichen und Wegstreichen der sich gegenseitig forthebenden Summenglieder eine Summe

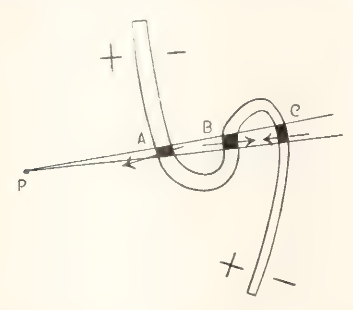


Fig. 20.

erhält, die ganz unabhängig von der Gestalt der Schicht gleich ist dem körperlichen Winkel ω, unter dem sich die Begrenzungslinie oder Randkurve der Doppelschicht[1]) dem Auge in P darbietet. Also

$$\sigma_1' + \sigma_1'' + \sigma_1''' + \ldots = \omega, \ldots\ldots 7)$$

wobei die oberen Indizes die Zugehörigkeit der einzelnen Summenglieder zu den verschiedenen Elementarmagneten kennzeichnen sollen.

Gleichung (5) läßt sich wegen Gleichung (6) schreiben

$$v = l.J.d.\sigma_1.$$

Das Gesamtpotential V der ganzen Doppelschicht im Punkte P wird erhalten durch Addition aller Potentiale v', v'', v''', ..., die von den einzelnen Elementarmagneten herrühren. Dabei läßt sich der über die ganze Schicht unveränderliche Faktor l.J.d, der zur Abkürzung mit Φ bezeichnet werde, ausscheiden und man erhält

$$V = l.J.d\,(\sigma_1' + \sigma_1'' + \sigma_1''' + \ldots.)$$
$$= \Phi.\omega \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots 8)$$

nach Gleichung (7).

Das Potential in einem Feldpunkte P stellt sich dar als das Produkt zweier Größen. Die eine Größe, $\Phi = l.J.d$, hängt von dem magnetischen Zustande und der Dicke der Doppelschicht, sowie vom Maßsystem (s. 2 d) ab, man nennt sie das Moment oder die Stärke der Schicht. Die zweite Größe, ω, ist der körperliche Winkel, unter dem die Randkurve der Schicht von dem Punkte P aus erscheint. Mit anderen Worten: bei unveränderter Randkurve ändert sich das Potential — und damit nach 3 d 5 auch der Betrag der Feldstärke $\mathfrak{H}$ — im selben Verhältnis wie die Stärke Φ der Schicht, ist aber gänzlich unabhängig von der sonstigen Form der Schicht, solange die Stärke dieselbe bleibt. Es läßt sich also auch das Feld H der Doppelschicht in der Form

$$H = c_1.\Phi \ldots\ldots\ldots\ldots 9)$$

darstellen, wo die Größe c_1 nur noch von den geometrischen Verhältnissen, d. h. Gestalt der Randkurve der Schicht und Lage des Punktes P abhängt und — wenigstens in einfachen Fällen — berechenbar ist.

4f) Magnetomotorische Kraft der Doppelschicht. Die als Stärke der Doppelschicht bezeichnete Größe gewinnt noch eine andere anschauliche Bedeutung durch folgende Betrachtung.

Ein Punkt P wandere auf die positive Seite der Doppelschicht zu, wie dies der Pfeil der Figur 21 andeutet.[1]) Dabei wächst der räumliche Winkel, unter dem die positive Seite der Schicht von P aus erscheint. Schließlich, wenn der Punkt auf der positiven Seite bei A angekommen ist, schneiden die von P nach der Randkurve gezogenen Strahlen aus der Einheitskugel die halbe Kugeloberfläche heraus, also die Fläche 2π. Das Potential V_1 in A hat daher nach Gleichung (8) den Wert

$$V_1 = (l.J.d).2\pi$$
$$= 2\pi.\Phi.$$

Rückt der Punkt P weiter durch die Schicht hindurch bis B auf der negativen Seite, so hat hier der körperliche Winkel wieder die Größe 2π[2]), er ist aber jetzt negativ, da die Schicht dem Auge in P ihre negative Seite zukehrt. Das Potential V_2 in B ist also

$$V_2 = -(l.J.d).2\pi$$
$$= -2\pi.\Phi.$$

Die Potentialdifferenz zwischen A und B hat die Größe

$$V_1 - V_2 = 4\pi.\Phi \ldots\ldots\ldots 10)$$

Danach ist die Stärke der Doppelschicht auch zu definieren als die Potentialdifferenz der positiven und negativen Seite der Schicht, dividiert durch 4π. Die beiden Seiten der Schicht sind Aequipotentialflächen mit einer durch die Stärke der Schicht gegebenen Potentialdifferenz.

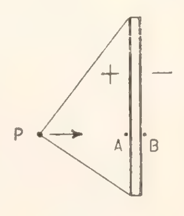


Fig. 21.

Es springt hier die Aehnlichkeit der Verhältnisse mit der elektrischen Erscheinung bei der Berührung zweier verschiedener Leiter in die Augen; auch dort bildet sich eine (elektrische) Doppelschicht, indem sich positive Elektrizität auf der einen Seite der Berührungsfläche, negative auf der anderen ansammelt bis zu einem bestimmten Betrage, d. h. bis eine bestimmte elektrische Potentialdifferenz zwischen den beiden

[1]) Die Schicht soll ja verschwindende Dicke haben, daher kann man von einer Begrenzungslinie, statt Begrenzungsfläche reden.

[1]) Der Einfachheit wegen ist die Schicht als eben angenommen; das Folgende gilt aber, wie leicht zu übersehen, auch für beliebig gekrümmte Doppelschichten.

[2]) Es ist wieder zu beachten, daß die Schicht verschwindende Dicke haben soll.

Leitern entstanden ist, die man als die bei der Berührung der beiden Leiter wirksame elektromotorische Kraft bezeichnet. Die magnetische Doppelschicht hat also gewissermaßen, solange ihre Stärke ungeändert bleibt, eine bestimmte „magnetomotorische Kraft", und alles magnetische Geschehen im Felde ist durch diese magnetomotorische Kraft und durch die Form der Randkurve der Schicht vollständig bestimmt.

Es ist dies einer der Ausgangspunkte der formalen Analogien, die zwischen magnetischen Feldern und elektrischen Strömungsvorgängen aufgestellt worden sind, und von denen in dem Artikel „Magnetische Influenz" ausführlicher die Rede ist.

5. Das Feld elektrischer Ströme. 5a) Der lineare Strom als Element beliebiger Strömung. Die Untersuchungen mögen angeknüpft werden an die durch Figur 22 angedeutete Form eines Stromkreises[1]), also an einen beliebig zu einfachem Umlauf zusammengebogenen Draht, der in der Richtung des Pfeiles von einem Gleichstrom der Stärke i durchflossen ist. Der Drahtdurchmesser soll verschwindend klein sein gegen die Abmessungen der Strombahn. Man nennt einen solchen Stromkreis einen linearen. Auf ihn lassen sich alle beliebigen konstanten Strömungen zurückführen durch Zerlegung des Gesamtstromes in Stromfäden oder dünne Bündel von Stromlinien, und damit sind auch alle Gesetze des magnetischen Stromfeldes am linearen Stromkreise zu gewinnen.



Fig. 22.

Alle Beobachtungen, an die in diesem Kapitel angeknüpft wird, sind an stromdurchflossenen von Luft umgebenen Leitern gemacht worden. Alle aus diesen Beobachtungen gewonnenen Sätze gelten also zunächst nur unter der Annahme, daß alle Ströme von Luft umgeben sind. Im Artikel „Magnetische Influenz" wird untersucht, wieweit die Gültigkeit der Sätze beim Fallenlassen dieser Einschränkung reicht.

5b) Gleichwertigkeit von linearem Strom und Doppelschicht. Die Beobachtung in Luft ergibt, daß der Betrag des Stromfeldes $\mathfrak{H}_S$ in jedem beliebigen Feldpunkte P sich im selben Verhältnis ändert wie die Stromstärke i. Man kann also schreiben

$$H_S = c.i,$$

wo c eine experimentell bestimmbare Größe ist, deren Wert wie immer von der Wahl der Maßeinheiten, in denen H_S und i gemessen werden, und außerdem von der Form der Strombahn abhängt und sich im allgemeinen von Punkt zu Punkt ändert. Man denke sich nun eine magnetische Doppelschicht (4e) mit ihrer Randlinie längs der Strombahn angeheftet — etwa wie eine Seifenlamelle, die an der Strombahn nach dem Eintauchen in eine Seifenlösung hängen bleibt. Die Strombahn bildet also die Randkurve der Schicht. Die magnetische Achsenrichtung und die Stärke Φ der Doppelschicht sollen so gewählt werden, daß das Feld $\mathfrak{H}_D$ der Schicht im Punkt P dasselbe wird, wie das des Stromes i. Man hat also nach 4e Gleichung (9) Φ aus der Gleichung auszurechnen

$$H_D = H_S = c_1\,\Phi = c.i \;.\;.\;.\;.\;.\; 11)$$

Die Erfahrung zeigt nun weiter, daß das berechnete Feld der so angenommenen Doppelschicht von der Stärke Φ mit dem beobachteten Felde des Stromes i nicht nur im Punkte P übereinstimmt, sondern in allen Punkten. Für einen beliebigen Punkt P' gilt also ebenfalls, wenn H'_D und H'_S die Feldstärken der Doppelschicht und des Stromes in P' bezeichnen,

$$H'_D = H'_S$$

oder

$$c'_1.\Phi = c'.i,$$

wo c'_1 und c' die Werte sein sollen, die c_1 und c im Punkte P' annehmen. Aus dieser Gleichung und aus

$$c_1.\Phi = c.i$$

folgt

$$\frac{c_1'}{c_1} = \frac{c'}{c},$$

d. h. die Größen c in den verschiedenen Feldpunkten verhalten sich wie die Größen c_1; sie können sich also von diesen nur um einen Faktor unterscheiden, der nicht mehr von c_1, d. h. von den räumlichen Verhältnissen, abhängt, sondern nur noch vom Maßsystem. Es läßt sich also schreiben

$$c = \varkappa.c_1$$

und nach Gleichung (11)

$$c_1.\Phi = \varkappa.c_1.i,$$

woraus

$$\Phi = \varkappa.i \;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;.\;. 12)$$

Hierin liegt der wichtige Satz:

8. Das Feld eines linearen, von konstantem Strom i durchflossenen Stromkreises stimmt überein mit dem Felde einer Doppelschicht, die die lineare

[1]) Die Kurve ist perspektivisch, nicht in der Zeichenebene liegend zu denken. Der stärker gezeichnete Teil soll vorn liegen.

Strombahn zur Randkurve und die Stärke $\Phi = \varkappa.i$ hat, sonst aber beliebig gestaltet ist. Der Wert der Konstanten $\varkappa$ hängt nur von den Maßeinheiten ab und wird im absoluten Maßsystem gleich 1. Strom und Doppelschicht von gleichem Felde heißen äquivalent oder gleichwertig.

5c) Die $\mathfrak{H}$-Linien des linearen Stromes. Jede $\mathfrak{H}$-Linie der Doppelschicht läuft (vgl. Fig. 23) von einem Punkte A der positiven Seite im Bogen um den Rand der Schicht herum zu einem Punkte B der negativen Seite (vgl. auch den Artikel „Magnetische Influenz" Fig. 11). Dasselbe gilt von den $\mathfrak{H}$-Linien des entsprechenden, in der Randkurve der Schicht fließenden Stromes. Um das Feld in der verschwindend kurzen Strecke BA innerhalb der Schicht kümmerten sich die bisherigen Untersuchungen überhaupt nicht. Für den Strom unterscheidet sich die Strecke BA in nichts von jeder anderen Stelle des Feldes, zumal die Strecke BA durch Gestaltsänderung der Doppelschicht an beliebige Stellen des Feldes verlegt werden kann, ohne daß der Verlauf der einzelnen $\mathfrak{H}$-Linie sich ändert (4e). Die $\mathfrak{H}$-Linien des Stromes müssen also auf der Strecke BA ungestört im einmal eingehaltenen Richtungssinne weiter laufen, d. h.

8a. Die $\mathfrak{H}$-Linien eines linearen, konstanten Stromes bilden geschlossene, die Strombahn umkreisende Kurven. Dabei bestimmen sich der Umlaufsinn des Stromes und der der $\mathfrak{H}$-Linien gegenseitig nach folgender, der Erfahrung zu entnehmender Regel:

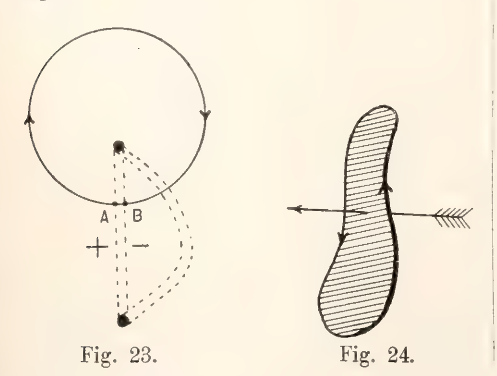


Fig. 23. Fig. 24.

8b. Der Umlaufsinn der durch einen Punkt P des Stromfeldes gehenden $\mathfrak{H}$-Linie wird durch den seitwärts ausgestreckten linken Arm angedeutet, wenn man sich mit dem Strome schwimmend denkt und dabei das Gesicht dem Punkte P zuwendet. (Ampèresche Schwimmregel),

oder: man denke sich durch eine von der Strombahn umgrenzte Fläche (in Figur 24 schraffiert) einen Korkzieher so hindurchgebohrt, daß sein Umdrehungssinn mit dem Umlaufsinn des Stromes zusammenfällt. Die Richtung, in der dabei der Korkzieher vordringt (gefiederter Pfeil der Figur 24), ist die, in der die $\mathfrak{H}$-Linien durch die Stromschleife hindurchtreten (Korkzieher- oder Rechtsschraubenregel).

5d) Magnetomotorische Kraft im Stromfelde. Es werde jetzt wie in 3b ein Einheitsnordpol durch das Feld geführt. Er laufe zunächst auf beliebigem Wege vom Punkte A (Fig. 23) um den stromdurchflossenen Draht herum wieder nach A zurück. Rührte das Feld von einer dem Strome gleichwertigen Doppelschicht her, so würde dabei auf dem Wege von A bis B von den magnetischen Kräften eine Arbeit geleistet, deren Betrag gleich der Potentialdifferenz zwischen den Punkten A und B ist, d. h. nach 4f Gleichung (10) eine Arbeit

$$A = 4\pi.\Phi$$
$$= 4\pi\varkappa.i.$$

Dazu kommt bei dem vollständigen Umlaufe im Stromfelde noch die Arbeit auf dem Wege BA; diese Arbeit aber wird mit verschwindender Dicke der Doppelschicht verschwindend klein und kann unberücksichtigt bleiben. Es gilt also Satz

9. Beschreibt ein Einheitsnordpol im Felde eines linearen Stromes einen vollständigen Umlauf auf beliebiger Bahn, die mit der Strombahn in der Art verschlungen ist wie ein Kettenglied mit dem anderen, so wird dabei von den magnetischen Kräften die Arbeit $4\pi\varkappa.i$ geleistet. $\varkappa$ hat im absoluten Maßsystem den Wert 1. Man nennt diese Arbeit die in dem Polkreislauf vorhandene magnetomotorische Kraft (s. Abschnitt 4f Schluß).

Erfolgt der Umlauf nicht einmal, sondern N-Male, so wird die Arbeit oder die magnetomotorische Kraft

$$A = 4\pi\varkappa.N.i \quad \ldots\ldots\ldots 13)$$

Dieselbe Arbeit würde von den magnetischen Kräften geleistet bei einmaligem Polumlauf um einen Strom von der Stärke N.i oder um N lineare Ströme von der Stärke i. Die magnetomotorische Kraft von N Stromwindungen ist also das N-fache der magnetomotorischen Kraft der Einzelwindung.

Führt die Bahn nicht in der beschriebe-

nen Weise um den stromdurchflossenen Draht herum, sondern verläuft etwa wie die Kurve A B C A von Figur 25, in der P

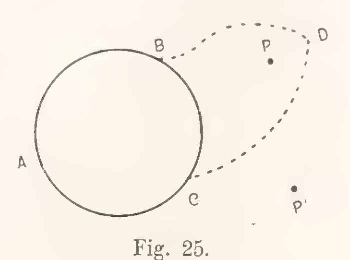


Fig. 25.

un P' die Durchstichpunkte des linearen Stromkreises durch die Zeichenebene sind, so ist die Arbeit der magnetischen Kräfte am Einheitspol beim Durchlaufen der Bahn A B D C A gleich der auf der Bahn C B D C; d. h. die auf dem Wege C A B von den magnetischen Kräften geleistete Arbeit ist gleich der auf dem Wege BC *gegen* die magnetischen Kräfte geleisteten, wie im statischen magnetischen Felde. Also

10. *Für jeden nicht mit der Strombahn verschlungenen Polumlauf gilt wie im statischen Felde Satz 3* (s. Abschnitt 3b).

5e) *Unbestimmtheit des Potentials. Feld im Mittelpunkt eines linearen Kreisstromes.* Konstruiert man Niveauflächen (s. Abschnitt 3b), so haben diese sämtlich die Strombahn zur gemeinsamen Begrenzungslinie. Mögen (Fig. 26) v und v' zwei solcher Niveauflächen andeuten, wenn P und P' wieder die Durchstichpunkte der Strombahn durch die Papierfläche sind. Es folgt dann aus Satz 9 und 10 genau wie in 3b, daß der Energieaufwand für die Beförderung eines Einheitsnordpoles von v nach v' derselbe ist auf dem Wege AB wie z. B. auf CD, dagegen um den Betrag $4\pi\varkappa.i$ größer, wenn man von A um den Stromleiter herum über E nach B geht. *Von einer bestimmten Potentialdifferenz zweier Niveauflächen v und v' kann man hier nicht mehr reden* — es wäre das nur dann möglich, wenn man das Umkreisen der Strombahn auf Wegen wie A E B durch Anlage einer *Sperrfläche* (PP'), die sich zwischen der Stromkurve ausspannt, verhinderte.

Dagegen behalten Satz 4, 5 und 6 (s. 3d) auch hier ihre Gültigkeit.

Es berechnet sich also z. B. die Feldstärke H im Mittelpunkte eines kreisförmigen Drahtes vom Radius r in folgender Weise. In Figur 27 ist die Kreisfläche der Strombahn senkrecht zur Zeichenebene gedacht, P und P' deuten die Querschnitte des Drahtes an, der so vom Strome i durchflossen sei, daß dieser bei P in die Papierfläche hinein, bei P' aus ihr heraus tritt. Die Feldstärke H hat dann im Kreismittelpunkte M nach Satz 8b und aus Symmetriegründen die Richtung des Pfeiles. Das Potential in M ist nach 4e Gleichung (8) und nach Satz 8 gleich

$$V_M = \varkappa.i.2\pi.$$

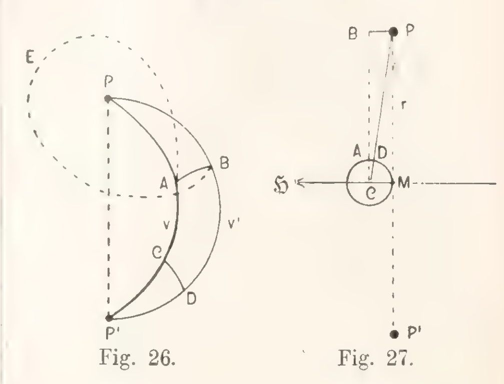


Fig. 26. Fig. 27.

Vom Punkte C aus, der von M die Entfernung 1 hat, erscheint die Strombahn nicht mehr unter dem körperlichen Winkel 2π, sondern die von C nach dem Stromkreise gezogenen Strahlen schneiden aus der um C beschriebenen Einheitskugel eine Fläche heraus, die gleich ist der halben Kugeloberfläche vermindert um eine Zone von der Breite AD und vom Radius 1. Da AD sehr klein ist, sobald die Längeneinheit hinreichend klein gewählt wird, so gilt die Proportion

$$AD : BP = CA : CB$$

oder da $PB = MC = AC = 1$ und $CB = r$ ist,

$$AD = \frac{1}{r}.$$

Die Kugelzone hat also die Fläche

$$AD.2\pi.CA = \frac{2\pi}{r}.$$

Also ist das Potential in C gleich

$$V_c = \varkappa.i.\left(2\pi - \frac{2\pi}{r}\right)$$

$$= \varkappa.i.2\pi - \varkappa.i.\frac{2\pi}{r}.$$

Die Differenz von V_M und V_c gibt nach 3d Satz 5 den Betrag der Feldstärke $\mathfrak{H}$ in M

$$H = V_M - V_c = \varkappa.i.\frac{2\pi}{r},$$

also im absoluten Maßsystem nach Satz 8

$$H = i.\frac{2\pi}{r}.$$

5f) *Felder von geradem Draht, Solenoid, Toroid.* Es mögen hier noch drei Beispiele von Stromfeldern kurz besprochen werden.

1. *Ein sehr langer gerader Draht.* Figur 28 zeigt das Eisenfeilbild. Die $\mathfrak{H}$-Linien sind Kreise, deren Mittelpunkte sämtlich in der Drahtachse und deren Flächen senkrecht zum Drahte liegen. Die Feldstärke $\mathfrak{H}$ hat aus Symmetriegründen in allen Punkten einer $\mathfrak{H}$-Linie dieselbe Größe. Es ist also die beim einmaligen Umlauf eines Einheitsnordpoles längs einer $\mathfrak{H}$-

Linie vom Radius r von den magnetischen Kräften geleistete Arbeit oder die magnetomotorische Kraft (5 d 9) einerseits gleich $H.2\pi r$, wenn H die Größe der Feldstärke im Abstande r

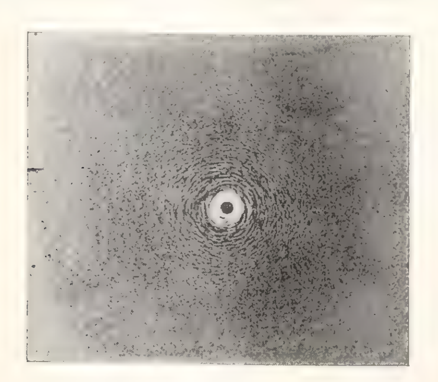


Fig. 28.

von der Drahtachse bezeichnet; andererseits gleich $4\pi \varkappa . i$, wenn i die Stromstärke ist. Also besteht die Gleichung

$$H.2\pi r = 4\pi \varkappa . i$$

oder

$$H = \frac{2 \varkappa . i}{r}.$$

In zwei verschiedenen Entfernungen r_1 und r_2 von der Drahtachse stehen also die Feldstärken H_1 und H_2 in dem Verhältnis

$$H_1 : H_2 = r_2 : r_1.$$

Hiernach läßt sich das $\mathfrak{H}$-Linienbild sehr leicht konstruieren (Fig. 29). Auf Grund von 5 d Gleichung 13 ändert sich die mit dem Pol-

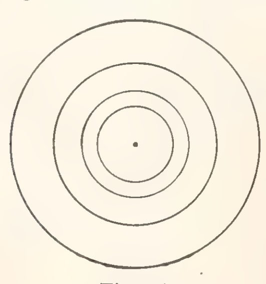


Fig. 29.

umlauf verbundene Arbeit nicht, wenn man sich den Strom i in n lineare Ströme der Stärke $\frac{i}{n}$ zerlegt denkt. Verteilt man diese n Ströme noch symmetrisch um den ursprünglichen Draht, läßt sie also etwa im Mantel eines Zylinders, der den Draht zur Achse hat, fließen, so bleibt auch das Feld aus Symmetriegründen außerhalb des Zylinders ungeändert, im Innenraume ist es null nach Satz 10.

2. Gerades Solenoid. Der Stromleiter bilde eine dicht gewickelte gerade Spirale von kreisförmigem Querschnitt, ein sogenanntes gerades Solenoid. Das Eisenfeilbild (Fig. 30) zeigt, daß die $\mathfrak{H}$-Linien im mittleren Teil des Solenoides parallele Gerade sind. Die Niveauflächen sind also hier Ebenen senkrecht zur Achse des Solenoides, und das Feld ist gleichförmig. Um seine Größe zu finden, denke man



Fig. 30.

sich die einzelnen Stromwindungen durch gleichwertige Doppelschichten (s. 5 b) ersetzt, die also, wenn i der Strom in der Spirale ist, nach Gleichung (12) die Stärke

$$\Phi = \mathrm{l}.J.d = \varkappa . i$$

haben. Kommen auf die Längeneinheit der Solenoidachse n Windungen, so ist die Dicke d der einzelnen Doppelschicht

$$d = \frac{1}{n},$$

also

$$\frac{\mathrm{l}.J}{n} = \varkappa . i$$

oder

$$J = \frac{\varkappa}{\mathrm{l}}.n\,i = C.n.i,$$

wenn für $\frac{\varkappa}{\mathrm{l}}$ zur Abkürzung C gesetzt wird. Denkt man sich Doppelschichten der berechneten Stärke aneinandergeschichtet (Fig. 31), so geht eine Wirkung nach außen nur von den Solenoidenden aus, wo die magnetischen Mengen $J.q = C.n.i.q$ verteilt sind, wenn q der Querschnitt des Solenoides ist. Sonst kommen überall gleichgroße nord- und südmagnetische Mengen zusammen zu liegen, können also keine Wirkung ausüben.[1]) Hinsichtlich der Wirkung nach außen

[1]) Das Eisenfeilbild zeigt nicht nur von den Enden, sondern auch seitlich austretende $\mathfrak{H}$-Linien, weil bei dem hier vorhandenen beträchtlichen Abstand der Doppelschichten die Wirkungen der entgegengesetzten magnetischen Be-

verhält sich das Solenoid wie ein zylindrischer Magnetstab, bei dem sich magnetische Mengen nur auf den Endflächen befinden, also wie ein magnetisches Solenoid (s. 4 d).

Um das Feld im Innern zu erhalten, z. B. in P, muß man sich die den Punkt P enthaltende Doppelschicht weggebogen denken — ohne dabei ihre Stärke zu ändern — wegen der vorläufigen

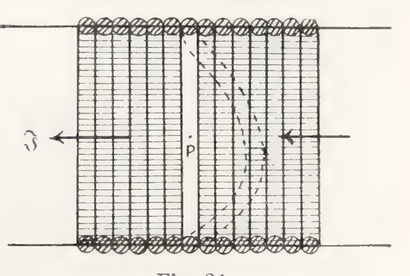


Fig. 31.

Unkenntnis der Verhältnisse im Innern der Schicht (5c). Hat die Magnetisierung $\mathfrak{J}$ die Richtung der Pfeile, so befindet sich jetzt rechts von P freiwirkender Nordmagnetismus, links freiwirkender Südmagnetismus. Da die Schichten wie immer sehr dünn sein sollen, so ist gegen das von diesen beiden magnetischen Belegungen herrührende Feld das der abgebogenen Doppelschicht zu vernachlässigen; es kommt indessen noch hinzu die entgegengesetzt gerichtete Wirkung von den Solenoidenden. Macht man das Solenoid so lang, daß auch diese Wirkung verschwindet, so ist das Feld in P lediglich das im Innern einer aus Luft bestehenden Doppelschicht von der Dicke d die ihre positive Seite rechts, die negative links und die Stärke $\mathrm{I.J.d} = \varkappa.\mathrm{i}$ hat. Die Potentialdifferenz der beiden Seiten ist nach 4 f Gleichung 10 gleich $4\pi\varkappa.\mathrm{i}$ und daher die Feldstärke nach 3 d 4 und 5

$$H = \frac{4\pi\varkappa.\mathrm{i}}{\mathrm{d}} = 4\pi\varkappa.\mathrm{n}.\mathrm{i}^{1)}.$$

3. T o r o i d. Das gerade Solenoid werde zu einem Kreisringe gebogen und die Enden verbunden. Es entsteht so ein sogenanntes Toroid. Die Gesamtzahl der Windungen sei N. Die $\mathfrak{H}$-Linien sind aus Symmetriegründen konzentrische, im Innern des Toroides laufende Kreise mit dem Mittelpunkte des Toroides als Zentrum, während außerhalb keine Linien verlaufen. Bewegt sich ein Einheitsnordpol auf einem dieser Kreise vom Radius r in der Richtung des Feldes, so leisten die magnetischen Kräfte bei einmaligem Umlaufe nach 5d Gleichung 13 eine Arbeit gleich der magnetomotorischen Kraft

$$\mathrm{H}.2\pi\,\mathrm{r} = 4\pi\varkappa.\mathrm{N}.\mathrm{i};$$

legungen sich erst auf größere Entfernung aufheben.

[1]) Die stärksten auf diese Weise herstellbaren Felder haben etwa 1500 absolute Einheiten oder Gauß (s. 1 d); die stärksten überhaupt herzustellenden Stromfelder (vgl. den Artikel „M a g n e t i s c h e I n f l u e n z" 8 b) etwa 40 000 Einheiten.

es ist also die Feldstärke H im Abstande r vom Ringzentrum

$$\mathrm{H} = \frac{2\varkappa.\mathrm{N}.\mathrm{i}}{\mathrm{r}}.$$

6. Das $\mathfrak{B}$-Linienbild des Feldes. 6a) D a s $\mathfrak{H}$ - L i n i e n b i l d a l s R e p r ä s e n t a n t d e r F e l d e r s c h e i n u n g e n. Das in 1 a genannte Ziel, die Mannigfaltigkeit der Felderscheinungen zusammenzufassen durch eine Felddarstellung, die den Verlauf aller möglichen magnetischen Vorgänge übersehen läßt, ist bis zu gewissem Grade erreicht mit der Feldabbildung durch die $\mathfrak{H}$-Linien.

Für das Feld von S r ö m e n ist sogar, solange sie nur von Luft umgeben sind (wie dies in Abschnitt 5 vorausgesetzt wurde), das $\mathfrak{H}$-Linienbild entbehrlich; schon durch die G e s t a l t d e r S t r o m b a h n e n und die Stromstärken i oder die m a g n e t o m o t o r i s c h e n K r ä f t e $4\pi\varkappa.\mathrm{N}.\mathrm{i}$ (siehe Gleichung 13) sind die Feldintensität $\mathfrak{H}$ und damit alle auf sie zurückführbaren Vorgänge im Feld völlig bestimmt, und in einfachen Fällen berechenbar (s. 5e und f). Es läßt sich zeigen, daß dies auch g a n z a l l g e m e i n bei beliebiger materieller Feldbeschaffenheit gilt (vgl. den Artikel „M a g n e t i s c h e I n f l u e n z" 5 a).

Das $\mathfrak{H}$-Linienbild ist aber unvollständig. Es fehlt für das Innere fester Körper, besonders der Magnete. Zu einer v o l l s t ä n d i g e n F e l d d a r s t e l l u n g gelangt man mit Hilfe eines neuen, aus den Induktionserscheinungen im magnetischen Felde abgeleiteten Feldmaßes.

6b) G e s e t z e d e r I n d u k t i o n. D e r V e k t o r $\mathfrak{B}$. Das Untersuchungsmittel ist eine einfache, etwa kreisförmige Drahtschleife S (Figur 32) mit zwei unmittelbar nebeneinander laufenden Zuleitungen Z_1

Fig. 32.

und Z_2. Die Kreisfläche der Schleife sei so klein, daß über ihre Ausdehnung das Feld als unveränderlich betrachtet werden kann. An die Zuleitungen Z_1 und Z_2 sei ein Galvanometer angeschlossen. Man beobachtet nun folgendes:

1. Bringt man die Drahtschleife S von einer Stelle des Raumes, an der kein Feld wahrzunehmen ist, in das Feld hinein, so fließt durch das Galvanometer eine Elektrizitätsmenge — ein sogenannter S t r o m s t o ß oder I n d u k t i o n s s t o ß — deren Gesamtbetrag sich nur mit der Endlage der Schleife verändert, also z. B. ganz unabhängig ist von dem Wege, auf dem sie in ihre schließ-

liche Lage gebracht wird, und von der Zeit, in der dies geschieht.[1]) Der Stromstoß charakterisiert also die einzelnen Feldpunkte in magnetischer Hinsicht. Beim Entfernen der Schleife aus dem Felde entsteht derselbe Stromstoß wie beim Hineinbringen, aber in entgegengesetzter Richtung.

2. Von der Richtung des Feldes an der Stelle, an die die Schleife gebracht wird, hängt der induzierte Stromstoß in der Weise ab, daß er ohne Aenderung seiner Stärke seine Richtung zugleich mit der Feldrichtung umkehrt. Ferner erreicht die Stärke des Stromstoßes einen Maximalwert i_0 für eine bestimmte Stellung der Schleifenfläche (s. f in Figur 33). Für eine Stellung f′, die mit f den Winkel α bildet, wird die Stärke i des Stromstoßes

$$i = i_0 . \cos \alpha .$$

Sind N und N′ die Senkrechten auf f und f′, so stehen also die Stromstöße i_0 und i in dem Verhältnis eines parallel zu N gerichteten Vektors und seiner Komponente nach der Richtung N′ (2 e Gleichung (3)). D. h. der induzierte Stromstoß für irgendeine Schleifenstellung ändert sich im selben Verhältnis wie die zur Schleifenfläche senkrechte Komponente, die sogenannte Normalkomponente, eines gewissen Vektors. Man nennt diesen Vektor daher die magnetische Induktion. Bezeichnen wir ihn mit $\mathfrak{B}$, seinen Zahlwert oder Betrag mit B, seine zur Schleifenfläche senkrechte Komponente mit $\mathfrak{B}_{N'}$, so gilt also

$$i = K . \mathfrak{B}_{N'} .$$

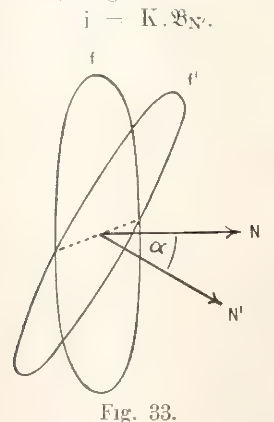


Fig. 33.

Der Faktor K hängt, wie die nähere Untersuchung zeigt, ab von der Größe s der Kreisfläche der Schleife und ändert sich im selben Verhältnis wie diese; er steht weiter im umgekehrten Verhältnis zu dem elektrischen Widerstande w der ganzen Strombahn. Man hat demnach

$$i = k . \frac{s}{w} . \mathfrak{B}_{N'} , \quad \ldots \ldots \quad 14)$$

wo k nur noch vom Maßsystem abhängt. Im absoluten Maße wird $k = 4\pi$ (s. Gleichung 16 und Artikel „Magnetische Influenz“ 3 a).

Willkürlich bleibt noch der Weisungssinn (s. 1 e) des neuen Vektors $\mathfrak{B}$. Zu seiner Festlegung denke man sich die Schleife aus dem Felde weggezogen. Der Umlaufsinn des dabei induzierten Stromes in der Schleife und der Weisungssinn der magnetischen Induktion $\mathfrak{B}$ sollen in der durch die Rechtsschraubenregel (5c 8 b) ausgedrückten gegenseitigen Abhängigkeit stehen.

Nach Gleichung 14 ist an einer Stelle des Feldes die Induktion B = 1 in absolutem Maße vorhanden, wenn durch eine Schleife, die an der Stelle senkrecht zur Richtung von $\mathfrak{B}$ steht, die Fläche 1 umspannt und zusammen mit den angeschlossenen elektrischen Leitern den Widerstand 1 in absolutem Maße besitzt, beim Herausziehen aus dem Felde der Stromstoß 4π in absolutem Maße fließt.

Zeichnet man Induktions- oder $\mathfrak{B}$-Linien, die überall die Richtung der magnetischen Induktion angeben und von denen durch jede senkrecht zu ihnen gestellte Flächeneinheit so viele hindurchgehen, als der Zahlwert der Induktion am Orte der Flächeneinheit angibt, so kann man nach 2e den Inhalt von Gleichung 14 auch so aussprechen: der zu irgendeiner Schleifenstellung zugehörige Induktionsstoß steht in direktem Verhältnis zu der Zahl von $\mathfrak{B}$-Linien, die in der betreffenden Stellung durch die Schleife hindurchtreten, oder, wie man kurz sagt, zu der Gesamtinduktion oder dem Induktionsfluß durch die Schleife.

3. Führt man die Schleife S von einem Punkte P_1 zu einem Punkte P_2 des Feldes, so berechnet sich der entstehende Induktionsstoß so. Wird S von einer Stelle außerhalb des Feldes nach P_1 gebracht, so ist der induzierte Stromstoß

$$i_1 = K . \mathfrak{B}_{1N'} ;$$

wird S auf dem Wege über P_1 nach P_2 gebracht, so wird

$$i_2 = K . \mathfrak{B}_{2N'}$$

induziert. Der Ueberführung von P_1 nach P_2 entspricht also der Stromstoß

$$i_2 - i_1 = K (\mathfrak{B}_{2N'} - \mathfrak{B}_{1N'}), \quad \ldots \quad 15)$$

d. h. er steht in direktem Verhältnis zu

[1]) Erfolgt die Bewegung so rasch, daß die Galvanometernadel in Ruhe bleibt, bis die Schleife ihre Endlage eingenommen hat, so entsteht dann ein sogenannter ballistischer Ausschlag der Nadel, der ein Maß für die durch das Galvanometer geflossene gesamte Elektrizitätsmenge ist.

dem Unterschiede der 𝔅-Linienzahl, die an der Stelle 2 und an der Stelle 1 durch die Schleife hindurchgeht.[1])

6c) Endlosigkeit der 𝔅-Linien. Die Erfahrung zeigt, daß der Induktionsstoß stets unmerklich klein wird, wenn die Schleife von einem Punkte P_1 nach einem hinreichend nahen Punkte P_2 bewegt wird; d. h. nach Gleichung 15 die Induktion B, die Zahl der durch die Schleife tretenden 𝔅-Linien oder die Normalkomponente $𝔅_{N'}$ ändert sich nirgends plötzlich; es ist also auch überall möglich, die räumliche Aenderung von 𝔅 durch kontinuierlich fortlaufende 𝔅-Linien abzubilden, während plötzlichen Aenderungen von B nur durch Aufhören- oder Anfangenlassen von Linien Rechnung getragen werden könnte (s. 4c). Dies gilt ganz allgemein, gleichgültig was für Körper sich im Felde befinden, denn die gegenwärtige Untersuchungsmethode gestattet auch, das Feld im Innern fester Körper zu erforschen. Befindet sich z. B. ein Eisenzylinder von kreisförmigem Querschnitt (Fig. 34) im Felde, so benutze man eine kreisrunde Drahtschleife von solcher Weite, daß sie genau über den Zylinder paßt. Wird die Schleife aus der Lage A unmittelbar oberhalb der einen Zylinderendfläche um ein sehr kleines Stück über das Zylinderende weg nach B geschoben, so entsteht kein Induktionsstrom, d. h. nach 6b 3: alle auf die Endfläche des Zylinders auftreffenden

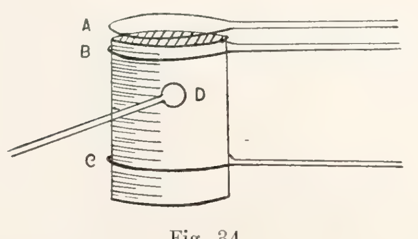


Fig. 34.

𝔅-Linien setzen sich ununterbrochen ins Innere fort. Dies gilt auch, wenn das Eisenstück beliebig magnetisiert ist, es gilt ganz allgemein. D. h.

11. Die 𝔅-Linien haben nirgends Endpunkte, sie sind sämtlich geschlossene Linien. Ihre Gesamtheit läßt sich in ringartige Bündel zerlegen, für die der Satz von der Erhaltung des Induktionsflusses oder 𝔅-Linienflusses (s. 2g) gilt, d. h. in denen sich der Betrag der Induktion im umgekehrten Verhältnis zum Bündelquerschnitt ändert. Zu beiden Seiten einer Fläche, die zwei Körper von verschiedenem μ trennt, sind die zur Fläche senkrechten Komponenten von 𝔅, die Normalkomponenten $𝔅_{N'}$, einander gleich.

Geht man mit der Schleife von B aus (Figur 34) weiter bis C, so entsteht also so lange kein Induktionsstrom, als keine 𝔅-Linien aus der Mantelfläche des Zylinders austreten. Sobald dies aber geschieht, ist aus der Größe des Stromstoßes nach 6b 3 die Gesamtzahl der aus einer Mantelzone von bestimmter Breite austretenden 𝔅-Linien festzustellen. Durch Absuchen der Austrittszone mit einer kleinen Drahtschleife D kann man dann weiter die Austrittsstellen im einzelnen und die Richtung des Austritts nach 6b 1 und 2 ermitteln.

6d) Zusammenhang von 𝔅 und ℌ in flüssigen und gasförmigen Körpern. Mit dem 𝔅-Linienbilde ist nun das Feld vollständig dargestellt, und man kann alles daraus ablesen, was unter gegebenen Bedingungen im Felde geschieht, wenn man den Zusammenhang der einzelnen magnetischen Erscheinungen mit der Induktion 𝔅 kennt. Was besonders den Zusammenhang zwischen dem neuen Feldmaße 𝔅 und dem früheren ℌ betrifft, so ist dieser außerhalb fester Körper experimentell festzustellen.

Zunächst zeigt sich, daß Richtung und Weisungssinn von 𝔅, so wie sie in 6b 2 definiert wurden, dieselben sind wie von ℌ.

Sodann ändert sich 𝔅 überall im selben Verhältnis wie die Feldstärke ℌ; d. h. es ist

$$𝔅 = \mu . ℌ \quad \ldots\ldots\ldots \quad 16)$$

Der Faktor μ hängt außer vom Maßsystem nur von der Natur des Mediums ab, in dem die Beobachtung vor sich geht. Stellt man z. B. dieselbe Feldstärke ℌ einmal in Luft, das andere Mal in einer Lösung von Eisenchlorid her, so zeigt sich 𝔅, d. h. nach 6b Gleichung 14 der Stromstoß in derselben Schleife bei derselben Schleifenlage um etwa 0,06% vergrößert.

Man nennt μ die Permeabilität der Körper. Es ist die Größe, deren Unveränderlichkeit im ganzen Felde in Abschnitt 4 und 5 vorausgesetzt wurde, wenn von magnetischer Gleichartigkeit aller im Felde befindlichen Körper die Rede war.

6e) Annahme über den Zusammenhang von 𝔅 und ℌ in festen Körpern. Wahre magnetische Mengen und wahre Magneti-

[1]) Umschließt die Schleife eine größere Fläche, so daß in deren Bereich B möglicherweise nicht mehr als unveränderlich gelten kann, so bleiben alle bisherigen Formeln bestehen, wenn man darin statt B den Mittelwert aller auf der Fläche vorkommenden B-Werte einsetzt.

sierung $\mathfrak{J}_0$. $\mathfrak{M}$-Linien. Magnetomotorische Kraft der Magnete. Für das Innere fester Körper ist eine experimentelle Entscheidung nicht möglich, hier kann es sich nur um die Zulässigkeit oder Nichtzulässigkeit von Annahmen handeln, die über den Zusammenhang zwischen $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ gemacht werden.

Für **nicht permanent magnetische** Körper ist die einfachste zulässige Annahme die, daß auch in ihnen wie in Gasen und Flüssigkeiten die durch Gleichung 16 ausgedrückte Beziehung besteht. D. h.: In allen nicht permanent magnetischen Körpern[1]) laufen die $\mathfrak{H}$-Linien im selben Sinne wie die $\mathfrak{B}$-Linien. Soweit die Permeabilität μ unveränderlich ist, unterscheidet sich das $\mathfrak{B}$- und $\mathfrak{H}$-Linienbild nur durch die ungleiche Dichte der Linien.

Wo zwei verschiedene Körper von verschiedenem μ zusammenstoßen, da treten nach 6c die $\mathfrak{B}$-Linien in unveränderter Zahl durch die Grenzfläche hindurch. D. h. denkt man sich an die Grenzfläche — in Figur 35

Fig. 35.

angedeutet durch gg — zwei kleine Flächen 1 und 2 unmittelbar von beiden Seiten her angelegt, so werden beide von gleichviel $\mathfrak{B}$-Linien durchsetzt. Die hindurchgehende $\mathfrak{H}$-Linienzahl ist nach Gleichung 16 gleich der $\mathfrak{B}$-Linienzahl dividiert durch μ. Da aber μ zu beiden Seiten der Grenzfläche verschiedene Werte hat, so gehen durch 1 und 2 ungleich viele $\mathfrak{H}$-Linien, wie nahe man auch die beiden Flächen aneinander rücken mag. Es müssen also notwendig in der Grenzfläche Endpunkte von $\mathfrak{H}$-Linien liegen.

Für die **permanenten Magnete** sind zwei gleich zulässige, d. h. mit den Erfahrungen nicht in Widerspruch stehende, Annahmen in die Theorie eingeführt worden.

1. Annahme: es gilt auch in den Magneten die Gleichung 16. Ist also die Permeabilität μ innerhalb und außerhalb der Magnete überall dieselbe, so sind die $\mathfrak{H}$-Linien wie die $\mathfrak{B}$-Linien geschlossene Kurven, es sind nirgends Endpunkte vorhanden. Haben aber die im Felde befindlichen Körper verschiedenes μ, so endigen in den Grenzflächen einzelne $\mathfrak{H}$-Linien, wie dies soeben gezeigt wurde.

Für das $\mathfrak{B}$-Linienbild von Magneten ist ähnlich wie im Falle des Stromfeldes (s. 6 a) ein Ersatz möglich. Man denke sich die Gesamtheit der $\mathfrak{B}$-Linien etwa eines Stabmagneten in so dünne Bündel zerlegt, daß über den Querschnitt jedes Bündels B als unveränderlich gelten kann. Jedes der Bündel tritt an einer Stelle aus dem Magneten aus und an einer anderen Stelle in ihn ein. Zwischen der Aus- und Eintrittstelle besteht eine bestimmte magnetische Potentialdifferenz. Man kann diese in Analogie zur Doppelschicht (s. 4 f am Schluß) als magnetomotorische Kraft des Bündels bezeichnen (doch ist sie nicht wie beim Strom gleich der Arbeit der magnetischen Kräfte bei einem geschlossenen Polumlauf). Wenn man nun für jedes Paar einander entsprechender Ein- und Austrittstellen der Bündel die Potentialdifferenz oder magnetomotorische Kraft angibt, und wenn ferner die magnetische Beschaffenheit μ im ganzen Raume bekannt ist, so ist durch diese Daten der ganze $\mathfrak{B}$-Linienverlauf bestimmt und in einfachen Fällen auch wirklich berechenbar (ein Beispiel war die Doppelschicht in einem Raume von überall gleichem μ; weitere Angaben über die Methode der Berechnung vgl. den Artikel „Magnetische Influenz" 5 b).

2. Annahme: die Gleichung 16 gilt überall außerhalb der Magnete, aber in diesen nicht. Auch im Innern der Magnete verlaufen $\mathfrak{H}$-Linien, und der Vektor $\mu\,\mathfrak{H}$ — wobei μ die Permeabilität der Magnete ist — ruft in einer über die Magnete geschobenen Drahtschleife einen Induktionsstrom hervor nach denselben Gesetzen wie außerhalb der Magnete, aber er wirkt nicht allein induzierend, sondern es wirkt ebenso ein zweiter Vektor $\mathfrak{J}_0$, so daß die Induktion $\mathfrak{B}$ sich darstellt als

$$\mathfrak{B} = \mu\,\mathfrak{H} + \mathfrak{J}_0,$$

wobei das + Zeichen als Abkürzung gebraucht ist für „$\mu\,\mathfrak{H}$ ist zusammenzusetzen nach dem Parallelogrammgesetz (2f) mit $\mathfrak{J}_0$". Der Vektor $\mu\,\mathfrak{H}$ wird als magnetische Polarisation bezeichnet und erhalte hier den Buchstaben $\mathfrak{M}$. Die $\mathfrak{M}$-Linien fallen also außerhalb der Magnete mit den $\mathfrak{B}$-Linien zusammen. Im Innern der Magnete sollen die $\mathfrak{M}$-Linien Endpunkte haben. Da aber nach 6 c die Induktion $\mathfrak{B}$ sich nirgends plötzlich ändert, die induzierend wirkenden Linien also alle kontinuierlich fortlaufen müssen, so muß jede $\mathfrak{M}$-Linie da, wo sie endet, durch eine $\mathfrak{J}_0$-Linie fortgesetzt werden. Die experimentelle Ausmessung des Feldes läßt die Lage der theoretischen Endpunkte der $\mathfrak{M}$-Linien unbestimmt und willkürlicher Annahme unterworfen. Man nimmt nun weiter

[1]) Mit Ausnahme der nicht regulären Kristalle, für die Gleichung 16 nicht gilt.

an, daß im Endpunkt einer $\mathfrak{M}$-Linie die wahre magnetische Menge 1 liegt — eine im Artikel „Magnetische Influenz" 3a näher erläuterte Bezeichnung — und zwar, da den $\mathfrak{M}$- wie den $\mathfrak{H}$-Linien ein bestimmter Fortlaufsinn (s. 2a) zugewiesen ist, im Ursprungspunkt einer $\mathfrak{M}$-Linie die nordmagnetische Menge 1, in ihrem Mündungspunkt die südmagnetische Menge 1. Wo also eine $\mathfrak{M}$-Linie mündet, entspringt eine $\mathfrak{J}_0$-Linie und umgekehrt. Beide Liniensysteme zusammen ergeben die geschlossenen Kurven der $\mathfrak{B}$-Linien. Der Vektor $\mathfrak{J}_0$ heißt die wahre Magnetisierung. Ueber den Zusammenhang der wahren magnetischen Mengen und Magnetisierung mit den in 1c und 4b definierten Größen vgl. den Artikel „Magnetische Influenz" 3a.

Es läßt sich nun wieder beweisen, daß das $\mathfrak{M}$- und $\mathfrak{J}_0$-Linienbild des Feldes vollkommen ersetzbar und bestimmt ist durch Angabe der Lage und Größe der wahren magnetischen Mengen. Allerdings läßt sich, der mathematischen Schwierigkeiten wegen, aus diesen das Feld und seine Erscheinungen bestimmenden Daten der Verlauf der Linien nur in den einfachsten Fällen wirklich berechnen.

Die beiden Annahmen 1 und 2 lassen sich also kurz so charakterisieren: nach 1 gibt es keine wahren magnetischen Mengen, nach 2 sind solche vorhanden; nach 1 sind die magnetomotorischen Kräfte die das Feld und seine Erscheinungen bestimmenden Daten, nach 2 sind es die wahren magnetischen Mengen. Die Annahme 2 erscheint weniger einfach, da sie das $\mathfrak{B}$-Linienbild in zwei Teile, das $\mathfrak{M}$- und $\mathfrak{J}_0$-Linienbild, zerlegt, doch bietet sie namentlich für die theoretische Behandlung der Energieverhältnisse des Feldes (vgl. den Artikel „Magnetische Influenz" 6) beträchtliche Vorteile gegenüber Annahme 1. Diese ist namentlich in der Technik gebräuchlich geworden.

Die Frage, welche der bestimmenden Größen, wahre magnetische Mengen oder magnetomotorische Kräfte, eine gewisse Unveränderlichkeit besitzen und somit als Repräsentanten aller Felderscheinungen unter verschiedenen Feldbedingungen gelten können, ist in neuester Zeit wiederholt experimentell untersucht worden, und es hat sich ergeben, daß in einem beschränkten Bereich von Veränderungen beide Größen konstant sind.[2])

Literatur. ***M. Faraday***, *Experimental researches in electricity, London 1839 bis 1855.* — ***C. F. Gauss***, *Werke, Bd. 5, Göttingen 1867* — ***W. Weber***, *Werke, Bd. 2, Berlin 1892.* — ***W. Thomson***, *Reprint of papers on electrostatics and magnetism, London 1872.* — ***J. C Maxwell***, *Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus, Berlin 1883.* — ***H. Hertz***, *Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft, 2. Aufl., Leipzig 1894.* — ***G. Kirchhoff***, *Gesammelte Abhandlungen, Leipzig 1882 und Vorlesungen über Elektrizität und Magnetismus, Leipzig 1891.* — ***H. v. Helmholtz***, *Wissenschaftliche Abhandlungen, Bd. 1 u. 3, Leipzig 1882, 1895 und Vorlesungen über Elektrodynamik und Theorie des Magnetismus, Leipzig 1907.* — ***F. Neumann***, *Vorlesungen über die Theorie des Magnetismus, Leipzig 1881.* — ***O. Heaviside***, *Electrical papers, London 1892.* — ***A. Ewing***, *Magnetische Induktion in Eisen und verwandten Metallen, Berlin und München 1892.* ***H. du Bois***, *Magnetische Kreise, Berlin und München 1894.*

Lehr- und Handbücher: — ***A. Beer***, *Einleitung in die Elektrostatik, die Lehre vom Magnetismus und der Elektrodynamik, Braunschweig 1865.* — ***J. Lamont***, *Handbuch des Magnetismus, Leipzig 1867.* — ***E. Mascart et J. Joubert***, *Leçons sur l'électricité et le magnétisme, Paris 1882.* — ***H. Gordon***, *A physical treatise on electricity and magnetism, London 1880.* — ***L. Boltzmann***, *Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichtes, Leipzig 1891, 1893.* — ***E. Gérard***, *Leçons sur l'électricité, 5. Aufl., Paris 1897.* — ***J. J. Thomson***, *Elemente der mathematischen Theorie der Elektrizität und des Magnetismus, Braunschweig 1897.* — ***P. Drude***, *Physik des Aethers auf elektromagnetischer Grundlage, Stuttgart 1894.* — ***G. Wiedemann***, *Die Lehre von der Elektrizität, 2. Aufl., Bd. 3, Braunschweig 1895.* — ***E. Cohn***, *Das elektromagnetische Feld, Leipzig 1900.* — ***H. A. Lorentz***, *Maxwells elektromagnetische Theorie, Bd, V 2, p. 63 der Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften, Leipzig 1904.* — ***M. Abraham und A. Föppl***, *Einführung in die Maxwellsche Theorie der Elektrizität, 3. Aufl., Leipzig 1907.* — ***H. Ebert***, *Magnetische Kraftfelder, 2. Aufl., Leipzig 1905.* — ***R. Gans***, *Elektrostatik und Magnetostatik, Bd. V 2, p. 289 der Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften, Leipzig 1907 und Einführung in der Theorie des Magnetismus, Leipzig und Berlin 1908.* — ***A. Winkelmann***, *Handbuch der Physik, Bd. V, II, Leipzig 1908.* ***G. Mie***, *Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus, Stuttgart 1910.*

G. Aeckerlein.

[1]) Weitere Regeln für das Zeichnen von $\mathfrak{H}$-Linien bei J. C. Maxwell, Lehrb. d. Elektrizität u. d. Magnet., und H. Ebert, Magnet. Kraftfelder.

[2]) Z. B. R. Gans und H. Weber, Zur Frage: Was bleibt in e. permanenten Magneten konstant? Annalen d. Physik (IV) **16**, p. 172; 1905, und R. Gans, Ann. d. Physik (IV) **22**, p. 481; 1907.

Magnetfeld der Erde.

1. Allgemeines: a) Schwere und Magnetismus. b) Induktion. c) Kräftepaar und Kraft. d) Inhomogenität des Magnetfeldes der Erde. e) Mathematische Definition des Feldes. 2. Methode der Beobachtung: a) Absolute Messungen der Stärke und Richtung der Feldkraft: α) Deklination. β) Inklination. γ) Horizontale Intensität. δ) Messungen auf dem Meere. b) Die Beobachtung der zeitlichen Aenderung des Magnetfeldes der Erde: α) Deklinationsvariometer. β) Horizontal-Intensitätsvariometer. γ) Vertikal-Intensitätsvariometer. 3. Die verschiedenen Magnetfelder der Erde: a) Das permanente Feld: α) Geographische Verteilung: aa) Isogonen. bb) Isoklinen. cc) Isodynamen. dd) Oertliche Störungen. ee) Aenderungen mit der Höhe. β) Theorie des permanenten Feldes: aa) Die Anwendung der Potentialtheorie. bb) Das berechnete magnetische Moment und die magnetische Achse der Erde. cc) Der potentiallose Anteil des Feldes. dd) Trennung der äußeren und inneren Ursachen des Feldes. ee) Verteilung des Magnetfeldes über die Erdoberfläche. ff) Zusammenfassung der formalen Untersuchung. gg) Die physikalische Deutung derselben. b) Die Variationsfelder: α) Die Säkular-Variation. β) Das tägliche Variationsfeld. γ) Das Störungsfeld A. 4. Zusammenfassung.

1. Allgemeines. Das magnetische Feld der Erde und seine zeitlichen und örtlichen Aenderungen kommen zustande durch die Uebereinanderlagerung von verschiedenen magnetischen Feldern, von denen jedes seine eigene zeitliche und örtliche Variation besitzt.

Die Trennung dieser verschiedenen Felder und das Studium der zeitlichen und örtlichen Variation jedes einzelnen Feldes führt am sichersten zur Erklärung des Ursprungs der verschiedenen Felder und ist daher die Hauptaufgabe der erdmagnetischen Forschung.

Bevor die einzelnen Felder und ihre Aenderungen gesondert untersucht werden, soll zunächst das Gesamtphänomen (die superponierte Wirkung aller Felder) an den Bewegungen einer frei aufgehängten Magnetnadel beschrieben werden.

1a) Schwere und Magnetismus der Erde. Während die Schwerkraft der Erde auf alle Körper proportional ihrer Masse, unabhängig von der Temperatur, wirkt, bevorzugt die erdmagnetische Kraft bestimmte, magnetisierbare Stoffe, Eisen, Nickel, Kobalt. Die magnetische Kraft der Erde auf diese Körper ist auch eine Funktion der Masse, aber abhängig von der Temperatur der Körper.

1b) Induktion. Die magnetische Erde induziert in diese magnetisierbaren Körper Magnetismus, so daß sie dadurch selbst zu schwachen Magneten werden und damit alle Eigenschaften erwerben, die den künstlichen Magneten zukommen, nämlich andere kleine magnetisierbare Massen anzuziehen, sich, wenn sie frei beweglich sind, im Felde eines anderen Magneten, z. B. der Erde, parallel zu seinen Kraftlinien einzustellen, und dort mit einer gewissen Kraft zu verharren.

1c) Kraft und Kräftepaar. Wir haben bei jedem Magneten ns, der sich im Feld eines anderen feststehenden Magneten NS (z. B. der Erde) befindet, zwei Kraftwirkungen zu unterscheiden. Der Magnet ns erfährt nämlich eine Anziehung nach NS hin und eine Drehung seiner Achse ns in die Kraftlinienrichtung der Stelle des Feldes von NS, in der er sich befindet. Auf ns wirkt also eine Kraft und ein Kräftepaar. Beide können zur Ausmessung des Feldes nach Richtung und Intensität dienen. Das Kräftepaar nimmt mit der dritten, die translatorische Kraft mit der vierten Potenz der Entfernung zwischen den Mittelpunkten von ns und NS ab.

Die translatorische Kraft wird darum klein gegen die rotatorische sein. Da es außerdem unmöglich ist, ns frei beweglich im Raum zu machen, so schaltet man in der Praxis bei der Ausmessung des erdmagnetischen Kraftfeldes die das Problem komplizierende translatorische Kraft ganz aus und benutzt hierzu nur die rotatorische Kraftwirkung. Man benutzt hierzu eine auf einer Spitze drehbare oder an einem Faden aufgehängte Magnetnadel. Bei der Fadenaufhängung bleibt die prinzipiell vorhandene translatorische Wirkung gering, weil sie mit einer Bewegung gegen die Schwerkraft verbunden ist, die gegenüber der magnetischen Feldstärke der Erde groß ist.

1d) Inhomogenität des Magnetfeldes der Erde. Das magnetische Erdfeld ist in erster Annäherung ein gleichförmiges Feld, wenigstens für Magnete von den gebräuchlichen Dimensionen. Es übt als solches keine translatorische Kraft auf die gebräuchlichen Magnete aus, weil die Kräfte, die auf die Pole n und s wirken, einander gleich sind.

Die Wirkung des Erdfeldes auf einen Magneten ist daher im wesentlichen nur eine rotatorische.

Genauere Untersuchungen dieser Frage durch Wägung eines 33 g schweren Magneten in verschiedenen Orientierungen zur Erde (Nordpol des Magneten nach N, E, W, S, oben, unten) ergaben, daß das Feld der Erde besonders an magnetisch gestörten Orten, schon genügend inhomogen ist, um eine translatorische Kraft auszuüben, die in den verschiedenen Lagen eine Gewichtsänderung des Magneten um $^1/_{1000000}$ bis $^1/_{100000}$ des Gesamtgewichtes verursacht. Die größte Differenz ergab sich an einem magnetisch besonders stark gestörten Ort in Alaska.

1e) Mathematische Beziehungen. Die praktische Ausmessung und zeitliche Ver-

folgung des erdmagnetischen Feldes geschieht also lediglich mit Hilfe der rotatorischen Kraftwirkung. Man bestimmt die Richtung und Größe dieser Kraft F. Für die Beobachtung durch absolute Messung ist aus instrumental-technischen Gründen am leichtesten die Messung von 2 Richtungswinkeln der Kraft und einer Intensitätskomponente. Es sind dies 1. die Deklination D oder der Winkel zwischen der Richtung der horizontalen Komponente und dem astronomischen Meridian; der Winkel wird positiv gerechnet, wenn das Nordende der Nadel vom Meridian nach Osten abweicht. 2. Die Inklination $\mathfrak{J}$ oder der Neigungswinkel der Kraftrichtung gegen die Horizontalebene, positiv gerechnet, wenn das Nordende der Nadel nach unten zeigt. 3. Die Intensitätskomponente in der Horizontalebene H.

Bei der Verfolgung der zeitlichen Aenderung des erdmagnetischen Feldes beobachtet man die Aenderung der Deklination $\varDelta D(')$ und der Horizontalintensität $\varDelta H$. Dagegen macht die Beobachtung der Inklinationsänderung große Schwierigkeit und man verfolgt daher statt dessen die Aenderung der vertikalen Kraftkomponente $\varDelta Z$.

Für die Rechnung und theoretische Ueberlegung sind dagegen folgende 3 Komponenten am geeignetsten: horizontal Komponente nach Norden $= +X$, nach Osten $= +Y$ und vertikal Komponente nach unten $= +Z$.

Die erdmagnetische Kraft eines Ortes oder die Feldstärke hat im C.G.S.-System die Dimension $l^{-1/2}m^{1/2}t^{-1}$. Die Einheit wird Γ-Gauß genannt. Die frühere Gaußsche Einheit in $mm^{-1/2}mg^{1/2}sec^{-1} = 0.1\,\Gamma$. Die britische Einheit $foot^{-1/2}\,grain^{1/2}\,sec^{-1} = 0{,}046108\,\Gamma$.

Die Einheit der Feldstärke herrscht an einem Orte, wo auf einem zur Richtung der Feldkraft senkrechten Magneten vom Momente eins das Drehmoment eins, oder auf einen Einheitspol die Kraft eins ausgeübt wird. Die Variationen werden gewöhnlich in $\gamma = 10^{-5}\,\Gamma$ gemessen.

Die Winkel werden in Graden und Minuten; die zeitlichen Aenderungen der Winkel $\varDelta D(')$ und $\varDelta I(')$ in Minuten gemessen. Statt der Winkelvariationen werden besser die zu den Hauptkräften senkrechten Störungskräfte $\varDelta D$ und $\varDelta I$ in γ gemessen, durch deren Hinzutreten man sich die Richtungsänderungen entstanden zu denken hat, so daß

$$\operatorname{tg} \varDelta D(') = \frac{\varDelta D}{10^5 H}$$

$$\operatorname{tg} \varDelta I(') = \frac{\varDelta I}{10^5 F}$$

da $\operatorname{tg} \varDelta D(') = \varDelta D(')\ \mathrm{arc}\ 1' = 0{,}0002909\ \varDelta D'$
so ist $\varDelta D = 29{,}1\ H\ \varDelta D(')$
analog ist $\varDelta I = 29{,}1\ F\ \varDelta I(')$

Der mathematische Zusammenhang der magnetischen Elemente und Komponenten und ihrer Variationen wird durch folgende Gleichungen dargestellt:

$$H = F \cos I;\ Z = F \sin I$$
$$X = H \cos D;\ Y = H \sin D$$
$$\varDelta H = \varDelta F \cos I - \varDelta I \sin I$$
$$\varDelta Z = \varDelta F \sin I + \varDelta I \cos I$$
$$\varDelta X = \varDelta H \cos D - \varDelta D \sin D$$
$$\varDelta Y = \varDelta H \sin D + \varDelta D \cos D$$
$$\varDelta F = \varDelta H \cos I + \varDelta Z \sin I$$
$$\varDelta I = -\varDelta H \sin I + \varDelta Z \cos I$$
$$\varDelta H = \varDelta X \cos D + \varDelta Y \sin D$$
$$\varDelta D = -\varDelta X \sin D + \varDelta Y \cos D.$$

2. Methode der Beobachtung. 2a) Absolute Messung der Stärke und Richtung der Feldkraft. Man benutzt zur Messung kleine, wenige Zentimeter große Magnete. Diese streben sich in die Kraftlinienrichtung einzustellen. Da man den Magneten nicht so aufhängen kann, daß er sich nach allen Richtungen drehen kann, so muß man die Messung der Kraftrichtung in 2 Messungen zerlegen; einmal gibt man dem Magneten Bewegungsfreiheit für Drehung in der Horizontalebene und mißt sein Azimut gegen den astronomischen Meridian, die Deklination. Zur Messung der Inklination gibt man andererseits einem Magneten Bewegungsfreiheit für Drehung in der Vertikalebene und mißt seinen Neigungswinkel gegen den Horizont.

Außer diesen Richtungswinkeln mißt man die Kraft in der Horizontalebene.

Alle Messungen können so genau ausgeführt werden, daß die zeitlichen Aenderungen in Richtung und Stärke des Feldes während der Messung, sich schon bemerkbar machen. Die Messungen müssen deshalb auf eine mittlere Messungszeit und einen bestimmten mittleren Wert des zu messenden magnetischen Elementes bezogen werden. Man bedarf deshalb zu genauen Messungen außer den Instrumenten für die absolute Messung noch solche, welche die zeitliche Aenderung des betreffenden magnetischen Elementes registrieren.

α) Deklination. Man benutzt zur Deklinationsbestimmung meist einen Magnettheodoliten, der im wesentlichen aus einem Horizontalkreis besteht und aus einem Fernrohr, das auf einem in der Horizontalebene frei drehbaren Magneten gerichtet ist. Der Magnet ist in der Drehachse des Theodoliten aufgehängt, trägt einen Spiegel, in dem sich das Fadenkreuz des Gaußschen Okulars des Fernrohres spiegelt. Kommt das gespiegelte und direkt gesehene Fadenkreuz zur Deckung, so sind Spiegelnormale und Fernrohrachse parallel. Eine Drehung des Magneten um 180° um seine Längsachse ermöglicht es, den Winkel zwischen Spiegelnormale und Magnetachse (Kollimation) zu bestimmen. Damit ist die Richtung des magnetischen Meridians auf dem Horizontalkreis festgelegt. Die Richtung des astronomischen Meridians ergibt sich aus Anvisierung einer Mire von bekanntem Azimut, oder der Sonne, des Polarsterns usw. Der

Winkel zwischen magnetischem und astronomischem Meridian ist die Deklination.

Zur Aufhängung der Nadel werden Stahlspitzen oder dünne Metall- oder Kokonfäden benutzt. Die Spitzen zeigen Reibung, die Fäden Torsion. Die Reibung sucht man durch leises Anklopfen, den Torsionseinfluß durch Messung seines Betrages zu eliminieren. Letzteres geschieht mittels eines Hilfsmagneten von etwa dreimal kleinerem Moment als der Hauptmagnet. Der Torsionseinfluß beim schwächeren Magneten ist entsprechend größer. Man wählt den Faden so dick, daß er den Deklinationsmagneten noch gerade tragen kann, da ja die Torsionskraft der Richtkraft des Magneten gegenüber möglichst klein werden soll. Da nun die Torsionskraft sich mit der 4. Potenz der Fadendicke ändert, die magnetische Richtkraft des gerade noch vom Faden getragenen Magneten mit der Masse des Magneten also mit dem Quadrat der Fadendicke (bei größerer Länge vielleicht etwas stärker, aber höchstens mit der dritten Potenz) sind möglichst dünne Fäden und entsprechend kleine Magneten am günstigsten, um den Torsionseinfluß zu vermindern.

Die Messung der Deklination zu Lande erreicht eine Genauigkeit von etwa 0′,2 in einem festen Observatorium, von etwa 1′ bei Feldmessungen.

β) Inklination. Die Inklination wird bestimmt mittels eines Inklinatoriums. Dies besteht aus einem Vertikalkreis, vor dem eine Magnetnadel spielt, die in der Vertikalebene Bewegungsfreiheit für Drehung besitzt. Die Nadel hat eine, durch ihren Schwerpunkt gehende, zu ihrer Längs- und Breitenrichtung senkrechte, horizontale Achse. Sie ist feinpoliert und rollt über Achatschneiden.

Die kleinen Reibungen der Achse auf den Schneiden werden am besten eliminiert, wenn man statt der definitiven Ruhelage kleine Schwingungen um dieselbe beobachtet und die Ruhelage daraus ableitet. Fehler, die aus einer Abweichung der magnetischen von der geometrischen Achse und wegen der unbekannten transversalen Abweichung der Lage des Schwerpunktes entstehen, sind durch Umlegen der Nadel (Vertauschen von vorn und hinten) oder durch Drehung des drehbaren Kreises samt der Nadel um 180° zu eliminieren. Um eine Längsverschiebung des Schwerpunktes gegen die Drehachse zu eliminieren, muß die Nadel ummagnetisiert werden.

Die mannigfachen Fehlerquellen, besonders die Reibung, machen die Messung der Inklination mittels Nadel zu einer recht ungenauen. Wesentlich bessere Resultate liefert die Messung der Inklination mittels Erdinduktor. Bei diesem Instrument wird die Eigenschaft eines Magnetfeldes, in einem gegen seine Kraftlinien bewegten Leiter elektrische Induktionsströme hervorzurufen, benutzt. Eine Kupferdrahtspule rotiert um eine Achse. Die pro Zeiteinheit erfolgende Zu- oder Abnahme der Zahl von Kraftlinien des Erdfeldes, welche von der rotierenden Spule eingefaßt werden, ist gleich dem absoluten Werte der in der Spule induzierten elektromotorischen Kraft. Ist die Drehachse der Spule also parallel zur Richtung der Kraftlinien des Erdfeldes, so wird bei einer Rotation keine Zu- oder Abnahme der Zahl der von der Spule eingefaßten Kraftlinien erfolgen, also auch keine elektromotorische Kraft induziert werden. Die Neigung dieser Stellung der Spulachse gegen die Horizontale ist J.

Die Spule wird bei der Messung zuerst so eingestellt, daß ihre Drehachse sich in der magnetischen Meridianebene neigen kann. Dann wird die Stellung, in der die Drehachse senkrecht steht, mittels Libelle gesucht, dann die Stellung, in der bei Rotation der Spule keine Induktionswirkung zustande kommt, in der die Drehachse der Spule also parallel zur Kraftlinienrichtung des Erdfeldes steht. Dies ist die Inklinationsrichtung. Die bei der Rotation in der Spule induzierten Ströme werden durch zwei Schleifkontakte abgenommen und zu einem Galvanometer geführt. Steht die Drehachse parallel zur Inklinationsrichtung, so ist das Galvanometer stromlos. Diese Nullstellung des Galvanometers wird durch langsame Neigung der Rotationsachse der Spule gesucht.

Die Meßgenauigkeit mit dem Erdinduktor erreicht 0′,2 bis 0′,1 in einem festen Observatorium. Bei Feldmessungen geringere Genauigkeit.

γ) Horizontalintensität. Bei dem dritten Bestimmungsstück des Feldes hat man die Kraft zu messen, mit der eine Magnetnadel vom Moment 1 im Meridian festgehalten wird. Hierzu vergleicht man 1. das Drehmoment H, das das Magnetfeld der Erde auf eine Magnetnadel ausübt, mit dem Drehmoment, das ein künstlicher Magnet vom Moment M in einer bestimmten Entfernung auf dieselbe Nadel ausübt.

Ablenkungsversuch. Man bringt zu dem Zweck, den Magneten M in einem bestimmten Abstand zur Nadel und mißt den Winkel, den die Nadel dadurch aus dem magnetischen Meridian abgelenkt wird. Man erhält dadurch $\frac{H}{M} = \frac{1}{\sin\varphi} \frac{2F}{e^3}$, wo φ der Ablenkungswinkel e die Ablenkungsentfernung und F die Ablenkungsfunktion bedeutet. Letztere hängt nur von e und von den Dimensionen von M und der Nadel ab. Sodann bestimmt man durch Schwingungsbeobachtungen die mechanische Einwirkung (Drehmoment) die der Magnet M unter Einwirkung der Horizontalintensität des Erdfeldes erfährt. Daraus erhält man $M.H = K\frac{\pi^2}{T^2}$, wo T die Schwingungsdauer und K das Trägheitsmoment des Magneten bedeutet. Die Kombination beider Gleichungen gibt H.

Die schwer bestimmbaren Größen F, e, K sind konstant; man bestimmt sie daher nur einmal

und faßt sie zu einer Konstanten $C = \pi \sqrt{\frac{2FK}{e^3}}$ zusammen. Gewöhnlich wird diese Theodolitkonstante C durch gleichzeitige Vergleichsmessungen mit dem zu untersuchenden Theodoliten und einem Theodoliten von bekanntem C bestimmt. Die Ablenkungs- und Schwingungsbeobachtungen müssen wegen der Aenderung des magnetischen Momentes M mit der Temperatur auf gleiche Temperatur reduziert werden, ferner wegen Aenderung der Deklination und Horizontalintensität, während der Messung auf einen mittleren Stand dieser Elemente korrigiert werden.

Die erreichte Genauigkeit beträgt etwa 2 bis 5 γ im festen Observatorium, etwa 5 bis 10 γ im Feld.

δ) Messungen auf dem Meere. Bei Beobachtungen an Bord eines Schiffes werden die Instrumente auf einen in kardanischer Aufhängung beweglichen Schlingertisch aufgestellt. Trotzdem bleiben 3 Hauptschwierigkeiten zu überwinden. 1. Das Schlingern des Schiffes verursacht erzwungene Schwingungen der Nadel von einiger Regelmäßigkeit, die durch zahlreiche sytematische Beobachtungen einigermaßen eliminiert werden können. 2. Der Einfluß der Drehung des Schiffes auf die Intensität wird durch gleichzeitige Kompaßbeobachtungen korrigiert. 3. Durch das Eisen, das sich an Bord des Schiffes befindet, wird das erdmagnetische Feld dort gestört. Das magnetische Feld an Bord setzt sich zusammen aus dem normalen erdmagnetischen Feld, dem Feld des vom Erdmagnetismus im Schiffseisen induzierten Magnetismus und dem Feld des im Schiffseisen vorhandenen permanenten Magnetismus. Der Einfluß des Schiffseisens wird durch die sogenannten Deviationsbeobachtungen bestimmt. Es sind hierzu im allgemeinen 12 charakteristische Schiffskonstanten durch gleichzeitige Beobachtungen an Bord und an Land zu bestimmen. Zur Bestimmung des erdmagnetischen Feldes auf der See mißt man Deklination, Inklination und Totalintensität; statt letzterer auch Horizontalintensität.

Zur Deklinationsbeobachtung benutzt man den Schiffskompaß. Derselbe besteht aus einem Schwimmkörper, der auf einer Spitze drehbar ist und zur Dämpfung der Unruhe und zur Entlastung der Spitze in eine Alkohol-Wassermischung taucht. Dieser Schwimmkörper trägt die Kreisteilung (die Rose), die sich an einer festen Marke vorbeidreht, und ferner das Deklinationsmagnetsystem, 8 langgestreckte Magnete. Die Spitze besteht aus Diamant-Aluminiumbronze, das Hütchen aus Saphir. In Verbindung mit Seekarten, die die Angaben über die Deklination der betreffenden Gegend enthalten, bildet der Kompaß ein äußerst wichtiges Mittel zur Bestimmung des Schiffskurses.

Die Messung der Inklination erfolgt im wesentlichen wie an Land, nur sind die Schneiden, auf denen die Nadelachse rollt, hier wegen der Schiffsbewegung sattelförmig.

Statt der Horizontalintensität wird auf See meist die Totalintensität beobachtet. Dazu wird ein Nadelinklinatorium (Lloyd Creak) verwendet. Es besitzt eine Einrichtung, mittels der die Inklinationsnadel durch eine Ablenkungsnadel abgelenkt werden kann. Diese Ablenkungsnadel wird dann einseitig beschwert und als Inklinationsnadel benutzt. Die Abweichung von der Inklinationsrichtung, die durch die einseitige Belastung entsteht, erlaubt mittels der Instrumentkonstanten das magnetische Moment dieser Ablenkungsnadel zu bestimmen. Horinzontalintensität wird auch zuweilen auf See gemessen, in gleicher Weise wie zu Land. Statt Fadenaufhängung braucht man auf See nur Spitzenaufhängung.

Die Genauigkeit bei Messungen auf See ist viel geringer als zu Land, unter günstigen Verhältnissen 10 γ; gewöhnlich nur 100 γ und $0^0.1$.

Seit dem Aufblühen der Luftschiffahrt benutzt man auch im Luftschiff und Freiballon den Kompaß zur Kursbestimmung.

2b) Die Beobachtung der zeitlichen Aenderung des Magnetfeldes der Erde geschieht mittels Variometer für Deklination, Horizontal- und Vertikalintensität. In jedem dieser Variometer befindet sich ein Magnet in Faden- oder Spitzenaufhängung. Der Magnet trägt einen Spiegel, von welchem ein Lichtbündel einer feststehenden Lichtquelle (Spalt) auf eine mit photographisch empfindlichem Papier bezogene Walze reflektiert wird. (Das Lichtbündel wird durch Sammellinsen zu einem Punkt zusammengezogen.) Die Walze dreht sich mit der Zeit.

α) Deklinationsvariometer. Die etwa 1 cm$\times$0,5 cm$\times$0,05 cm große Magnetlamelle hängt an einem etwa 25 cm langen 0,001 cm dicken Quarzfaden torsionsfrei parallel zu den Kraftlinien des Erdfeldes, deren zeitlichen Richtungsänderungen sie folgt. Bei der nur von der Entfernung Spiegel (am Magnet) — Walze abhängigen Empfindlichkeit entspricht meist 1 mm auf dem Registrierpapier 1′ Drehung des Magneten. Durch teilweise Aufhebung des Erdfeldes mittels Astasierung erreicht man leicht $\frac{0'.1}{\text{mm}}$ Empfindlichkeit.

β) Horizontal-Intensitätsvariometer. Dies ist genau wie das vorige gebaut; nur ist hier der Quarzfaden einige Zehntelmillimeter dick und die Magnetnadel ist durch Torsion dieses Fadens senkrecht zur Kraftlinienrichtung des Erdfeldes gedreht, so daß sie also EW steht. Auf die Nadel wirken zwei Drehmomente, die Torsion und die magnetische Feldkraft; letztere strebt die Nadel NS zu stellen. Schwankungen in

ihrer Stärke haben also Schwankungen der Nadelstellung zur Folge. Die übliche Empfindlichkeit schwankt etwa zwischen $\frac{1\gamma}{\text{mm}}$ bis $\frac{6\gamma}{\text{mm}}$. Sie wird durch Ablenkung mittels eines geeichten Magneten bestimmt.

γ) Vertikal-Intensitätsvariometer (Lloydsche Wage). Ein Magnet von 10 cm × 1 cm × 0,1 cm lagert mit Schneiden in sattelförmiger Achatlager/und ist um eine horizontale Achse drehbar. Da die Achse möglichst durch den Schwerpunkt geht, stellt sich der Magnet in die Inklinationsrichtung, aus der er durch einseitige Belastung (mittels Justierschräubchen) in die horizontale Lage überführt wird. Dort befindet er sich im Gleichgewicht zwischen Gravitationswirkung und Wirkung der Vertikalkomponente der Feldkraft. Aenderungen der letzteren haben also Drehungen des Magneten um die horizontale Achse zur Folge. Die gebräuchliche Empfindlichkeit — ebenso bestimmt wie beim Horizontalintensitätsvariometer — beträgt $\frac{2\gamma}{\text{mm}}$ bis $\frac{8\gamma}{\text{mm}}$.

Um die unregelmäßigen Aenderungen der Reibung der Schneiden in den Lagen zu vermeiden, hat man horizontale Torsionsaufhängung versucht.

Alle drei Variometer besitzen eine elektromagnetische Kupferdämpfung, um Eigenschwingungen der Magnete zu ertöten. Alle drei Variometer (Deklination im astasierten Zustand) unterliegen Temperaturänderungen, da die Momente ihrer Magnete damit schwanken. Die Temperaturänderungen des Registrierraumes werden deshalb mittels Thermograph aufgezeichnet und die Temperaturkoeffizienten der Variometer bestimmt.

Außer Aenderungen des Magnetfeldes und der Temperatur können noch andere Umstände eine Aenderung der Stellung der Magnete verursachen, so die langsam mit der Zeit fortschreitende Momentabnahme der Magnete, Torsionsnachwirkungen im Faden, Drehungen in der Kittung oder Klemmung der Fäden, Reibung der Magnete an der Dämpfungsvorrichtung, mechanische Erschütterungen usw. Es ist deshalb nötig, die Stellung der Magnete von Zeit zu Zeit (etwa wöchentlich) durch absolute Messungen zu kontrollieren.

Die gewöhnlich benutzte Registriergeschwindigkeit beträgt 1 mm = 3 Min. Außerdem wird zum Studium von Spezialfragen (internationale Terminstunden, Sonnenfinsternis usw.) eine größe Registriergeschwindigkeit 1 mm = 15 sec, eventuell auch größere Empfindlichkeit $\frac{0',1}{\text{mm}}$, $\frac{0,5\,\gamma}{\text{mm}}$ benutzt.

3. Die verschiedenen Magnetfelder der Erde. Die Ausmessung des Magnetfeldes der Erde und die zeitliche Verfolgung seiner Aenderungen mittels der oben beschriebenen Instrumente liefert ein umfassendes Bild der erdmagnetischen Verhältnisse. Aus der Verarbeitung der vorhandenen Messungen und Registrierungen geht hervor, daß man verschiedene erdmagnetische Felder unterscheiden kann, denen wohl eine gewisse physikalische Selbstständigkeit zukommt, wenngleich bisher nur ihre formale Trennung gelungen ist, und eine definitive Erklärung ihres physikalischen Charakters in vielen Punkten nocht nicht sicher erfolgt ist. Man kann sich danach den Vektor der erdmagnetischen Feldkraft F zusammengesetzt denken aus einem permanenten zeitlich unveränderlichen Vektor f, der bei weitem den größten Teil des Gesamtvektors ausmacht und über der Erde starke örtliche Verschiedenheit aufweist und aus drei zeitlich variablen Vektoren, nämlich 1. dem Vektor der sehr langsamen säkularen Variation E, 2. dem Vektor der periodischen sonnen- und mondtäglichen und -jährlichen Variation T und 3. dem Vektor der unperiodischen Schwankungen, der Störungen A, so daß also F = f + E + T + A ist. Aus theoretischen Ueberlegungen werden wir sehen, daß den Vektoren f und E (E ist nur die Variation von f) ein Magnetfeld entspricht, das zum größten Teil seinen Sitz innerhalb der Erde hat, den Vektoren T und A dagegen Magnetfelder, die zum größten Teil oberhalb der Erdoberfläche, in der Atmosphäre, ihren Sitz haben.

3a) Das permanente Feld f. α) Geographische Verteilung. Die Ausmessung des erdmagnetischen Feldes begann mit der ersten Deklinationsmessung um 1450. In den folgenden Jahrhunderten fanden vielfach gelegentlich Messungen der Deklination, später auch der Inklination statt. Seit Gauß', Webers und Humboldts Tätigkeit beginnt die systematische Vermessung der einzelnen Kulturländer. Die Dichtigkeit der Stationen der magnetischen Landesvermessung (von denen also die Werte von D, I, H bekannt sind) schwankt heute zwischen 1 pro 100 qkm (Niederlande) bis zu 1 pro 2500 qkm (Südafrika).

	Epoche der Karte	Zahl der Stationen	Dichtigkeit in qkm
Niederlande	1891	328	100
Kgr. Sachsen	1907,5	101	150
Maryland	1900	137	230
Dänemark	1905	170	235
Württemberg	1901	65	300
Britische Inseln	1891	677	465
Schweiz	1892	70	590
Frankreich	1896	617	870
Italien	1892	284	1010
Japan	1895	320	1190
Preußen	1909	265	1400
U. St. A.	1905	3500	2680
Oesterreich	1900	210	3220
Südafrika	1903,5	405	3500

Seit 200 Jahren trägt man die Deklinations- und Inklinationswerte der verschiedenen Orte in Karten ein und verbindet die Orte gleicher Deklination und Inklination durch Linienzüge, Isogonen und Isoklinen genannt. Seit 100 Jahren hat man auch Linien gleicher Intensität, Isodynamen gezeichnet. Neuerdings zeichnet man noch Linien gleichen Potentials V (Gleichgewichts- oder Niveaulinien, siehe unten). Ferner Isanomalen, d. h. Linien gleicher Abweichung des wahren Wertes von D, I, H oder des Potentials V, von den aus irgendeiner Annahme (z. B. aus der Potentialtheorie) abgeleiteten Größe von D, I, H, V. Ferner Linien gleicher zeitlicher Aenderung eines dieser Elemente. Wegen der zeitlichen Aenderung der obigen Größen müssen die isomagnetischen Liniensysteme auf eine bestimmte Epoche bezogen werden.

Das Material zu den heutigen magnetischen Karten stammt aus den Landesvermessungen, aus gelegentlichen Forschungsreisen, so von der Reise des I. M. S. Challenger und S. M. Gazelle und aus den internationalen Polarfahrten 1882/3 und 1902/3. 1891 hat Neumayer das gesamte Material in einen magnetischen Atlas zusammengefaßt. Neuerdings ermöglicht die internationale Kommission für erdmagnetische Forschung (seit 1898 Bristol), die alle 2 Jahre zusammentritt, ein Arbeiten nach internationalem einheitlichem Plane. Besonders umfangreich sind die erdmagnetischen Vermessungsarbeiten des Department of terrestrial Magnetisme der Carnegie Institution zu Washington. Seit 1905 sind durch sie Vermessungen des Stillen und Atlantischen Ozeans, von Canada, Westindien, Mexiko, Ost- und Südafrika, Persien und China unternommen worden. Auf Anlaß der betreffenden Regierungen wird außerdem zurzeit Britisch-Indien, Niederländisch-Indien, Aegypten, Südafrika, Madagaskar, Europäisch- und Asiatisch-Rußland, Türkisch-Asien, Argentinien, Neu-Seeland, Sardinien magnetisch vermessen.

Feste erdmagnetische Observatorien, denen auch vor allem die Beobachtung der zeitlichen Aenderung des erdmagnetischen Feldes obliegt, sind etwa 50 über die Erde verteilt. Die deutschen Observatorien sind in Potsdam (und Seddin, Nebenstation), München, Wilhelmshaven, Apia (Samoa), Tsingtau und die im Bergwerkbezirk gelegenen Bochum und Hermsdorf (die beiden letzten nur für D); die beiden letzten dienen hauptsächlich den praktischen Bedürfnissen des Bergbaus. In Wilhelmshaven und Tsingtau sind die Observatorien der Marinestation angegliedert.

aa) Isogonen. Figur 1 zeigt die Linien gleicher Deklination von 5° zu 5° in eine Weltkarte eingezeichnet. D schwankt von +180° bis —180° (+ ist östliche Deklination). Die Isogonen laufen in 4 Punkten zusammen, nämlich in den beiden geographischen Drehpolen und in den beiden Deklinationspolen der Erde. Die Isogonen müssen in diesen 4 Punkten zusammenlaufen, weil dort die Deklination, der Winkel zwischen magnetischem und geographischem Meridian unbestimmt wird. Vom geographischen Nordpol ist jede Richtung Süden, also der geographische Meridian unbestimmt; im magnetischen Pole wird die horizontale Richtkraft Null, die Magnetnadel stellt sich also in jede Richtung ein, der magnetische Meridian ist somit unbestimmt. Der magnetische Nordpol liegt 70° 30′ N.B. 97° 40′ W.L. Der Südpol liegt 73° 39′ S.B. 146° 15′ E.L.

Die magnetischen Pole bilden also nicht die Enden eines Erddurchmessers.

Die Linie, für die D = 0 ist, wird die agonische Linie genannt. Sie scheidet das Gebiet negativer (westlicher) Deklination (Europa, Afrika, Vorderasien, östliches Drittel von Nord- und Süd-Amerika, Westspitze von Australien) von dem Gebiet östlicher Deklination. Im Gebiet östlicher Deklination besteht eine Anomalie, eine Insel westlicher Deklination, die China, Japan und Ostsibirien umfaßt. An den magnetischen Polen drängen sich die Isogonen; D ändert sich hier schnell, am Aequator langsam.

Die Konvergenz der Isogonen an den geographischen Polen kompliziert das Bild unnötig, da diesen Polen eine besondere Stellung in der Verteilung des magnetischen Feldes gar nicht zukommt.

Die Konvergenz beruht lediglich auf der Definition der Deklination und dem Gang der geographischen Meridianlinien an den Polen. Die Isogonen sind daher für praktische Zwecke zwar zuweilen sehr nützlich, zur Darstellung der Verteilung des Feldes über der Erde aber ungeeignet.

bb) Isoklinen. Diese verlaufen weit regelmäßiger (s. Fig. 1). Sie umgeben die magnetischen Pole, wie Breitenkreise. In den Magnetpolen der Erde ist $\dot{I} = 90°$. Die Linie, auf der $\dot{I} = 0°$ ist, ist die aklinische Linie oder der magnetische Aequator. Derselbe hat angenähert die Form einer größten Kreislinie der Erde. Er schneidet den geographischen Aequator bei 7° und 170° WL; entfernt sich vom Aequator bis zu 13°. Die magnetische Aequatorebene ist gegen die geographische im selben Sinne geneigt wie die Verbindungslinie der Magnetpole gegen die Erdachse. Am Aequator drängen sich die Isoklinen; d. h. die Inklination ändert sich dort schnell, am Pol langsam.

cc) Horizontal-Isodynamen. Diese umgeben ähnlich wie die Isoklinen in den

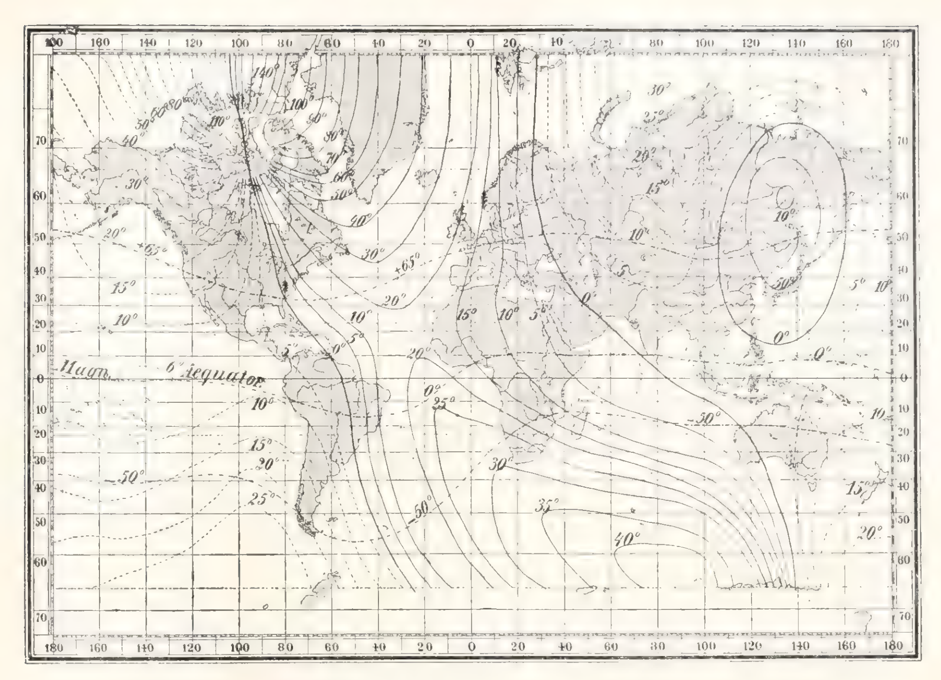


Fig. 1. Isogonen und Isoklinen nach Neumayer. Gültig für die Epoche 1900,0. ——— Linien gleicher westlicher, ... Linien gleicher östlicher Deklination; —.—.—.— Linien gleicher Inklination.
Entnommen aus Nippold, Erdmagnetismus. Sammlung Göschen.

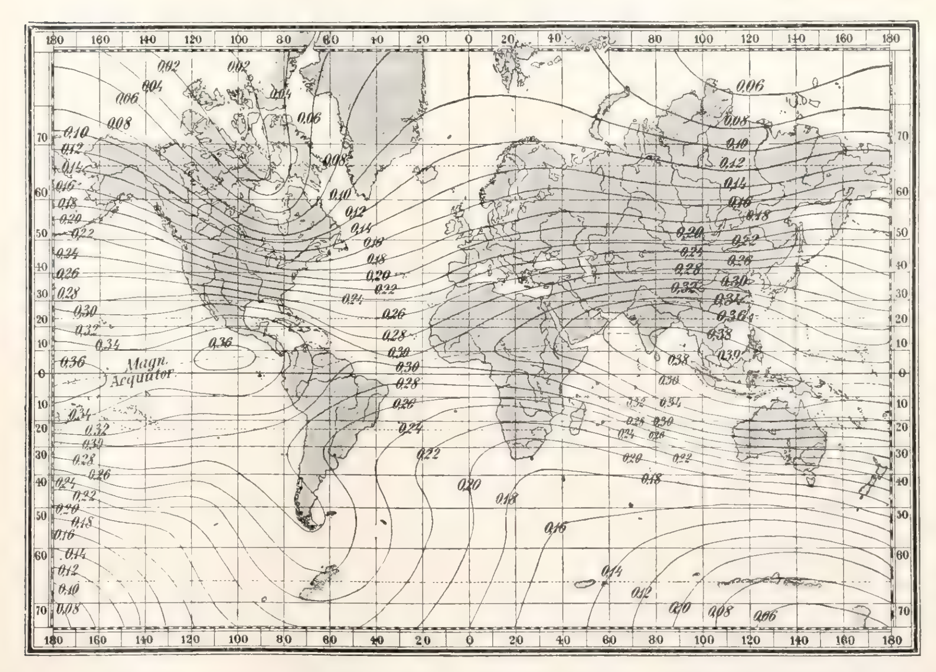


Fig. 2. Isodynamen der Horizontalintensität nach Neumayer. Gültig für die Epoche 1900,0. In C. G. S.-System.
Entnommen aus Nippold, Erdmagnetismus. Sammlung Göschen.

mittleren und höheren Breiten die magnetischen Pole als angenäherte Breitenkreise, nur daß hier der höchste Wert in der Aequatorgegend liegt 0,39 c. g. s., der niedrigste 0 an den magnetischen Polen (s. Fig. 2).

In der Aequatorgegend deformieren sich die Horizontal-Isodynamen sehr stark.

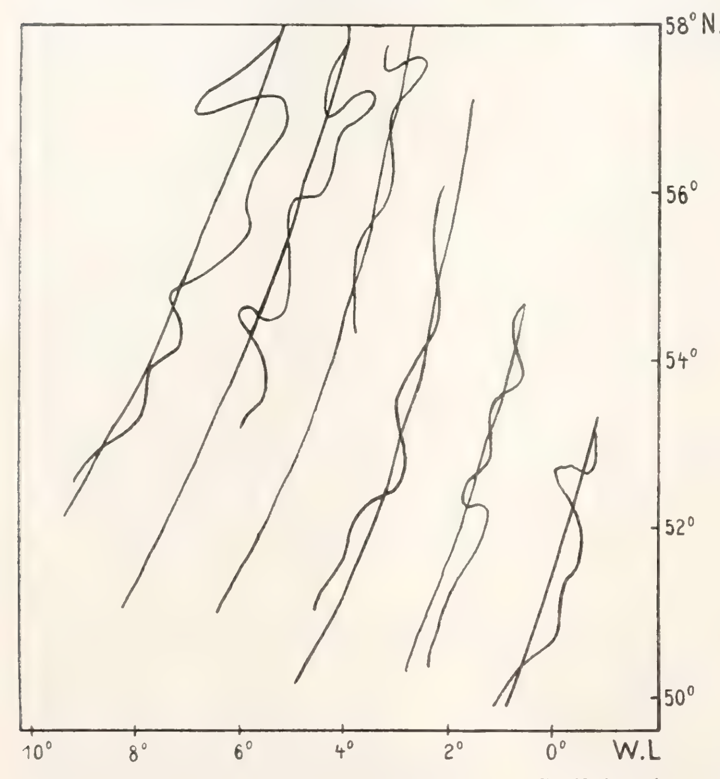


Fig. 3. Terrestrische und wahre Isogonen in Großbritannien.

Die Vertikalintensität erreicht ihr Maximum + 0,634 und — 0,674 in der Nähe der Magnetpole, ihr Minimum am Aequator.

Die Totalintensität wächst vom Aequator 0,28 zu den Magnetpolen, in deren Nähe sie ihr Maximum 0,71 erreicht (diese Stelle heißt Intensitätspol).

dd) Oertliche Störungen. An manchen Orten der Erde besitzen die erdmagnetischen Elemente Werte, die gar nicht in das allgemeine, in den obigen Karten dargestellte Liniensystem hineinpassen. Je dichter das Stationsnetz desto mehr solcher Anomalien treten auf. Figur 3 zeigt dies für Großbritannien, wo die geraden Linien sich dem allgemeinen Linienzug, den sogenannten terrestrischen Isogonen anschließen, während die krummen Linien den tatsächlichen Verlauf der Isogonen darstellen, die Lokalkurven. Solche örtliche Störungsgebiete heißen lokale zum Unterschied von regionalen Störungsgebieten, welche große Ländermassen umfassen, wie z. B. die Insel westlicher Deklination (China-Japan) im großen Gebiet östlicher Deklination.

ee) Aenderung mit der Höhe. Aus Beobachtungen auf Bergen scheint eine Abnahme von H um etwa $^1/_{10\,000}$ auf 100 m zu folgen. Beobachtungen im Luftballon sind für diese Frage zu ungenau. Bei Messungen im Bergwerk sind die Höhendifferenzen gering und lokale Störungen oftmals größer.

Die Kenntnis der Verteilung des Magnetfeldes der Erde findet mannigfache Anwendung; vor allem bei der Kursbestimmung in der Schifffahrt. Auch bei Ballonfahrten und im Bergwerk dient der Kompaß als Wegweiser. Eine Ortsbestimmung durch Deklinations- und Inklinationsmessungen scheint wenigstens in gut vermessenen Gebieten zu Lande wohl möglich; zur See wo sie praktisch wichtig wäre, sind die Instrumente und Methoden für genaue Ortsbestimmung noch nicht ausreichend.

β) Theorie des permanenten Magnetfeldes der Erde. *aa*) Die Anwendung der Potentialtheorie. Eine einheitliche Darstellung der Beobachtungsergebnisse, die in den Karten isomagnetischer Linien niedergelegt sind, gibt Gauß in seiner „Theorie des Erdmagnetismus". Diese Theorie ist frei von jeder Annahme über die Ursache des Magnetfeldes der Erde. Angenommen wird nur, daß die erdmagnetischen Wirkungen reziprok proportional dem Quadrate der Entfernung sind, die erdmagnetischen Kräfte ein Potential V besitzen; so daß also die Kraftkomponenten:

$$X = \frac{\delta V}{\delta x}; \quad Y = \frac{\delta V}{\delta y}; \quad Z = \frac{\delta V}{\delta z}.$$

sind. Auf der Erde ist V von der geographischen Länge l und Breite u abhängig. Betrachtet man die Erde als Kugel vom Radius a, so ist:

$$X = \frac{1}{a}\frac{\delta V}{\delta u}; \quad Y = \frac{1}{a \sin u}\frac{\delta V}{\delta l}$$

Da nun $Y = \frac{1}{\sin u} \int_0^u \frac{\delta X}{\delta l}\, du$, so kann Y und $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$ berechnet werden, wenn X für die ganze Erde bekannt ist.

V läßt sich nun durch Kugelfunktionen darstellen:

$$V = a\left[A_1\left(\frac{a}{r}\right)^2 + \ldots + A_n\left(\frac{a}{r}\right)^{n+1}\right]$$

worin r den Abstand vom Erdmittelpunkt bedeutet. V genügt der Laplaceschen Differentialgleichung $\Delta V = 0$, was zur Folge hat, daß A_n der Bedingung genügen muß.

$$n(n+1)A_n + \frac{\partial^2 A_n}{\partial u^2} + \cot u \frac{\partial A_n}{\partial u} + \frac{1}{\sin^2 u}\cdot\frac{\partial^2 A_n}{\partial l^2} = 0$$

somit ist A_n darstellbar durch $A_n = g_{n,0} A_{n,0} + (g_{n,1} \cos l + h_{n,1} \sin l) A_{n,1} + \ldots + (g_{n,n} \cos nl + h_{n,n} \sin nl) A_{n,n}$, g und h sind konstante Zahlenwerte, die von der Verteilung abhängen und sich also aus der Beobachtung ergeben. $A_{n,n}$ sind nur Funktionen von u.

Für die Erdoberfläche wird a=r; für eine innere Ursache des Magnetfeldes ist dann an der Oberfläche der Erde

$$\frac{V}{a} = A_1 + A_2 + \ldots$$

bb) Das berechnete magnetische Moment und die magnetische Achse der Erde. Die Berechnung der Koeffizienten für A_n erfordert viel Arbeit, weil die Anzahl der Koeffizienten für $A_n = 2n + 1$ ist, ihre Berechnung also gleichviel Gleichungen erfordert. Da jede Station mittels der dort beobachteten 3 Elemente 3 Gleichungen liefern kann, braucht man zur Berechnung der A bis zur vierten Ordnung 3+5+7+9 =24 Gleichungen oder 8 Stationen. Um die weitere Ausbildung dieser Theorie haben sich besonders v. Bezold, Ad. Schmidt und A. Schuster bemüht. Die Anwendung dieser Arbeitshypothese ermöglicht die Entscheidung einiger wichtiger Fragen über das Wesen des Erdmagnetismus.

So läßt sich jetzt das magnetische Moment der Erde angeben $M = 8{,}35 \times 10^{25}$ c. g. s. Danach würde der Radius einer bis zur Sättigung magnetisierten mit der Erde konzentrischen Eisenkugel, die die gleiche magnetische Wirkung wie die Erde besitzt $^1/_{26}$ des Erdradius betragen.

Die magnetische Achse der Erde, Die Achse ihres größten Momentes, ist ein Erddurchmesser, dessen Nordende bei $\varphi = + 78^0\, 34',3$, $\lambda = 68^0\, 30{,}6$ w liegt.

Sodann ist jetzt eine Entscheidung über die Richtigkeit der Annahmen, die der Theorie zugrunde gelegt wurden, möglich. Sind die Koeffizienten g und h berechnet, so läßt sich das Potential für jeden Punkt des Raumes angeben. Es lassen sich somit für D, I, H Karten berechnen und mit den aus der Beobachtung gewonnenen vergleichen. Bei den von Gauß und Neumayer durchgeführten Rechnungen zeigen sich erhebliche Abweichungen, aber auch große Uebereinstimmungen mit der Beobachtung.

cc) Der potentiallose Anteil. Die Annahme der Theorie war, daß die erdmagnetische Kraft ein Potential besitzt. Aus der allgemeinen Uebereinstimmung berechneter und auf Beobachtung beruhender Karten folgt, daß dies im wesentlichen der Fall ist. Genauere Auskunft hierüber erhält man folgendermaßen: Hat das permanente Magnetfeld der Erde ein Potential, so muß nach der Potentialtheorie das Integral über eine geschlossene ganz auf der Erdoberfläche verlaufende Linie null sein. Also $\int Sds = 0$, wo S die in die Richtung des Linienelementes ds fallende Kraftkomponente bedeutet. Solche Integrationen sind mehrfach über genau vermessene Gebiete durchgeführt und haben zu Werten geführt, die nicht mehr von Null abweichen, als bei der vorhandenen Messungsgenauigkeit zu erwarten stand. v. Bezold und L. A. Bauer haben jedoch Integrationen über ganze Breitenkreise ausgeführt, welche Werte ergaben, die systematisch von Null abweichen. $l_0 = \frac{\int Sds}{\int ds}$ bedeutet bei Breitenkreisen den Mittelwert der Ostkomponente Y. Es ergab sich nach v. Bezolds Rechnung in γ

$\varphi =$	$+60^0$	+50	+40	+30	+20	+10
$l_0 =$	$+40\gamma$	+110	+150	+100	0	—110
$\varphi =$	0^0	—10	—20	—30	—40	
$l_0 =$	$—130\gamma$	—80	—80	—210	—280	

Falls diese Abweichungen auf Beobachtungsfehlern beruhen sollten, müßten diese für manche Parallelkreise im Mittel 25% betragen haben. Es scheint danach ein Teil des erdmagnetischen Feldes kein Potential zu besitzen.

dd) Trennung der inneren und äußeren Ursache des Magnetfeldes. Die Reihe für V war entwickelt für eine Kugel, die magnetische Massen umschließt, also für den Teil des erdmagnetischen Feldes, der seine Ursache innerhalb der Erde hat, V_i. Sind außerdem noch Magnetfelder vorhanden, die ihren Sitz außerhalb haben V_a, so muß man die Reihe für V folgendermaßen ansetzen:

$$V = V_i + V_a = a\left[A_1\left(\frac{a}{r}\right)^2 + \ldots A_n\left(\frac{a}{r}\right)^{n+1} + B_1\left(\frac{r}{a}\right) + B_2\left(\frac{r}{a}\right)^2 + \ldots + B_n\left(\frac{r}{a}\right)^n\right]$$

Für die Horizontalkomponenten erhält man aus V_i und V_a korrespondierende Ausdrücke, während die Ausdrücke für Z entgegengesetzte Vorzeichen erhalten. Dies ermöglicht die getrennte Bestimmung von A und B, oder die Trennung des von inneren (v_i) und äußeren (v_a) Kräften herrührenden Potentials.

Die von Ad. Schmidt durchgeführte

Rechnung ergibt, daß die äußeren Kräfte $1/_{40}$ des Gesamtfeldes verursachen.

ee) Verteilung des permanenten Magnetfeldes auf der Erdoberfläche. Man kann das verwickelte Bild der Verteilung des permanenten Magnetfeldes außerordentlich vereinfachen, wenn man es aus der Ueberlagerung zweier Felder zu erklären versucht, von denen das eine symmetrisch um die Rotationsachse der Erde angeordnet ist, und das zweite die Störung dieser Symmetrie veranlaßt. Bildet man Mittelwerte des Potentials über Breitenkreise, so ist die Abweichung des Potentials eines Ortes von dem Mittelwert seines Breitenkreises die Anomalie des Ortes. Linien, die Orte gleicher Anomalie verbinden, heißen Isanomalen. v. Bezold fand, daß das Potential dieser normalen Verteilung schon durch den von der geographischen Länge unabhängigen Teil des ersten Gliedes der Gaußschen Reihe dargestellt wird, so daß $\frac{V_n}{a} = g_{1,0}$ $\sin \mu$ ist. Der Hauptteil des erdmagnetischen Feldes liegt also symmetrisch zur Rotationsachse der Erde.

L. A. Bauer nimmt das ganze erste Glied der Gaußschen Reihe, erhält dadurch ein Feld das symmetrisch zu einer Achse liegt, die gegen die Rotationsachse um 11° geneigt ist und dessen Moment etwa 98% des Gesamtmomentes der Erde beträgt. Der kleine Rest, der durch die übrigen Glieder der Gaußschen Reihe dargestellt wird, ist das anomale Feld, das etwa 8 Pole enthält.

ff) Zusammenfassung der formalen Untersuchung. Die Hauptresultate der bisher lediglich formalen Bearbeitung des Beobachtungsmaterials mittels der Gaußschen Potentialtheorie sind also 1. Bestimmung der Größe des magnetischen Momentes der Erde und der Lage der magnetischen Achse; 2. Nachweis eines potentiallosen Anteils des magnetischen Feldes und Bestimmung seiner Größe; 3. Trennung der innerhalb und außerhalb der Erde gelegenen Kräfte, die das Magnetfeld der Erde verursachen; 4. Trennung eines normalen, symmetrisch zur Rotationsachse gelagerten Magnetfeldes vom Potential V_n von einem anomalen Felde.

gg) Die physikalische Deutung der obigen Ergebnisse führt zur Frage nach der physikalischen Ursache des Magnetfeldes der Erde. Wir kennen 3 verschiedene Ursachen von Magnetfeldern, nämlich 1. permanente Magnete, 2. weiche Eisenmassen, in denen durch elektrische Ströme Magnetismus induziert wird, 3. elektrische Ströme. Aus Erdbebenbeobachtungen folgt, daß die Dicke der äußeren festen Erdrinde etwa 30 km beträgt, ferner daß im Erdinnern wahrscheinlich in 1500 km Tiefe ein Kern von fast genau der Dichte des Eisens liegt. Die geothermische Tiefenstufe führt schon in geringen Tiefen zu hohen Temperaturen, bei denen permanenter Magnetismus und Induktion in weichen Eisenmassen nicht mehr möglich ist. Man glaubt deshalb trotz des wohl vorhandenen großen Eisenkernes in 1500 km Tiefe die magnetischen Massen im Erdinnern, permanente wie durch Induktion erregte, auf die dünne feste Schale von ca. 30 km Dicke beschränken zu müssen. Diese feste Rinde enthält nun aber meist nur schwach magnetisierbare Substanzen, deren permanenter oder induzierter Magnetismus zur Erklärung des berechneten hohen magnetischen Momentes der Erde wohl nicht ausreichen würde; so daß man gezwungen ist, als Quelle der Kraft nicht permanente oder temporäre Magnete, sondern elektrische Ströme selbst anzunehmen; diese müssen ganz innerhalb der Erde verlaufen, da sie selbst den Hauptanteil des Magnetfeldes darstellen (nicht etwa ihre außerdem vorhandene Induktionswirkung in die Erdrinde, die ja zu klein ist). Den Ursprung dieser elektrischen Ströme glaubt man durch die Rotation der Erde gegen den ruhenden Aether zu erklären (Verschiebungsstrom). So entstehen Ostweströme, die das normale, zur Rotationsachse symmetrische Feld hervorbringen. Die Meere aber werden von elektrischen Strömen, entgegen dem Uhrzeigersinn, umkreist, die sich wegen der größeren elektrischen Leitfähigkeit des von Wasser durchtränkten Küstengeländes aus dem Hauptstromsystem abgezweigt haben. Diese Ströme bilden das anomale Feld und lenken das normale Feld derart ab, daß die magnetische Achse um 11° gegen die Rotationsachse geneigt ist.

Demgegenüber läßt sich nun einwenden, daß die Magnetisierbarkeit tiefer liegender größerer Eisenmassen durch die dort herrschende hohe Temperatur vielleicht doch nicht ganz verloren geht, sondern daß die Temperaturwirkung auf die Magnetisierbarkeit durch die hohen Drucke überlagernder Erdmassen wieder teilweise rückgängig gemacht wird. Aus den Volumänderungen beim Uebergang stark magnetisierbaren α- und β-Eisens in schwachmagnetisierbares γ-Eisen folgert man allerdings, daß Druckzunahme die Umwandlungstemperatur erniedrige. Ob dies auch für hohe Drucke gilt, scheint nicht sicher zu sein. Experimentell ist die Aenderung der Umwandlungstemperatur bei Druckzunahme wohl noch nicht geprüft.

Schreibt man auch tiefer liegenden Schichten eine hohe magnetische Permeabilität zu, so würden verhältnismäßig geringe äußere, in der Atmosphäre verlaufende

Ströme genügen, um das Magnetfeld der Erde zu erklären. Solche äußere Ströme sind nun wahrscheinlich gemacht, da nach der Trennung innerer und äußerer Ursachen $^{1}/_{40}$ des Potentials des Erdmagnetfeldes seinen Sitz außerhalb der Erde haben muß. Die Ursache dieses Teiles V_a kann aber wohl nur in atmosphärischen elektrischen Strömen bestehen, denn eine direkte magnetische Fernwirkung der Sonne, des Mondes oder der Planeten ist wegen der großen Entfernung nicht angängig.

L. A. Bauer glaubt, daß bei einer magnetisierenden Kraft von 0,0024 c. g. s. der äußeren elektrischen Ströme, die er aus der Trennung von V_a und V_i ableitet, das erdmagnetische Feld erklärt sei, wenn die Erde eine mittlere Permeabilität von der Größenordnung 115 (bezogen auf Luft) besitzt. Danach wäre die Erde ein Elektromagnet, dessen Erreger ein in der Atmosphäre sitzendes Stromsystem ist, das durch negative West - Ost - zirkulierende Elektrizität veranlaßt wird. Ueber die Ursache dieser West-Ost-Zirkulation besteht noch keine einigermaßen begründete Anschauung. Jedoch denkt man sie sich in Zusammenhang mit der Rotation der Erde entstanden, wodurch dann wieder die Symmetrie des normalen Feldes gegenüber der Rotationsachse ihre Erklärung findet. Horizontale luftelektrische Ströme der unteren Atmosphäre können wohl nicht zur Erklärung herangezogen werden, da bei Konvektionsströmen die durch die Winde (z. B. Passate) geförderten Elektrizitätsmengen viel zu gering sind. Ueber die obere Atmosphäre wissen wir zu wenig von den dort herrschenden Windgeschwindigkeiten und Elektrizitätsmengen, als daß sich darauf eine Rechnung gründen ließe.

Außer dem äußeren und inneren Potential des Magnetfeldes ergab die Rechnung noch einen potentiallosen Anteil. Dieser kann seinen Ursprung wohl nur in elektrischen Erdluftströmen haben, die zum Teil innerhalb der Erde verlaufen, die Oberfläche senkrecht durchsetzen und in der Atmosphäre weiter verlaufen. Der Wert des Integrals über eine geschlossene, in der Erdoberfläche verlaufende Kurve ist dann ein Maß für die Richtung und Größe dieser Ströme

$$\int S\,ds = 4\pi J$$

wo J die Stromstärke der vertikalen Erdluftströme bedeutet. Die Stärke dieser Ströme ist etwa

$+50^{\circ}$B	$+38 \times 10^{-13}$ Amp/cm²
$+20^{\circ}$B	-52 "
-10°B	$+24$ "

Luftelektrische Vertikalströme von gleicher Größenordnung kennen wir nicht Der luftelektrische Vertikalstrom setzt sich aus Leitungsstrom J_l, Konvektionsstrom durch Regen J_R und durch vertikale Luftbewegung J_L zusammen; deren mittlere jährliche Dichte beträgt

$$J_l = 2-3 \times 10^{16}\ \text{Amp/cm}^2$$
$$J_R = 6-40\ \text{,,}\quad\text{,,}$$
$$J_L = 1\ \text{,,}\quad\text{,,}$$
$$\text{Sa: maximum } 44 \times 10^{-16}\ \text{,,}$$

Er ist also etwa 1000mal zu klein. Eine definitive Erklärung des endlichen Wertes von $\int S\,ds$ durch Beobachtungsfehler oder Vertikalströme steht daher noch aus.

3b) Die Variationsfelder. Zu dem oben beschriebenen permanenten Feld f addieren sich die Felder der zeitlichen Variation nämlich der säkularen E, der sonnen- und mondtäglichen und -jährlichen Variation T und der Störungen A. Die Summe dieser Variationen wird mit den Variationsinstrumenten registriert; die Zerlegung der Summe E+T+A in ihre Bestandteile geschieht rechnerisch.

Man bildet zu dem Zweck an der Hand der Registrierkurve Stundenmittel für D, H und Z, die Stundenmittel faßt man zu Tagesmitteln, die Tagesmittel zu Monatsmitteln, die Monatsmittel zu Jahresmitteln zusammen und eliminiert dadurch etwaige periodische Variationen (die täglichen, monatlichen, jährlichen). Die Reihe der Jahresmittel gibt den langsamen veränderlichen, säkularen Vektor E. Andererseits bildet man den sonnentäglichen und mondtäglichen Gang eines magnetischen Elementes, indem man nach Sonnen- oder Mondstunden fortschreitend das Monatsmittel einer jeden Stunde bestimmt (es ist das Mittel der Stundenwerte derselben Stunde an allen Tagen des Monats), so erhält man T. Man kann in T am besten auch noch die anderen periodischen Vektoren hineinziehen, außer den sonnen- und mondtäglichen noch den jährlichen, und falls er existiert den monatlichen, zumal die letzten drei gegen den ersten Vektor klein sind. Der Vektor der Störungen hat für kurze Zeiträume einen unregelmäßigen Gang und schnellen Verlauf. Für eine bestimmte Stunde läßt er sich in der Praxis einfach als die Differenz der Gesamtvariation gegen T bezeichnen. Der säkulare Vektor hat einen sehr langsamen Gang, die jährliche und mondtägliche Variation ist sehr klein, so daß bei der Betrachtung eines kurzen Zeitraumes als Gesamtvariation einer einzelnen Stunde die Abweichung dieses Stundenmittels vom Tagesmittel genommen werden kann.

Die Differenz dieser Gesamtvariation gegen den Betrag der täglichen Variation für diese Stunde ist dann der Störungsbetrag.

α) Die Säkularvariation. Die säkulare Aenderung der Deklination zu Paris zeigt Figur 4.

Die Aenderung ist jedoch nicht an allen Orten gleich. Das gesamte System der Isogonen verschiebt sich im Laufe

der Jahrhunderte. Die magnetischen Pole wandern (s. Fig. 4a u. 4b n. v. Bemmelen).

Der mittlere jährliche Betrag der säkularen Variation betrug (von 1905 bis 1908):

		ΔD	ΔH	ΔZ	ΔI
(+ 52° B)	in Potsdam	6′	— 10γ	— 20γ	— 1′
(— 14° B)	in Samoa	2′	— 20γ	— 30γ	— 7′

Theorie der Säkularvariation. Die Ansichten konvergieren dahin, daß das permanente Feld f aus zwei Systemen besteht, die zueinander senkrecht stehen, das eine ist polar gerichtet (normale Feld), das andere äquatorial (anomale), das erstere ist 5mal stärker als das letztere; wodurch die Achse des Gesamtsystems um 11° gegen die Rotationsachse geneigt wird. Beide Systeme haben ihre gesonderte säkulare Bewegung in Länge und Breite; jedes nach eigener Periode. Gestützt wird diese Anschauung einmal dadurch, daß die Isanomalen der Inklination zwei Zentren größter Abweichung in der Aequatorgegend haben, die man als ein sekundäres Polpaar betrachten kann. Ferner hat Carlheim-Gyllenskiöld rechnerisch die vorliegenden Daten der säkularen Variation analysiert und gefunden, daß das permanente Feld sich aus verschiedenen Teilen zusammensetzt, die jedes mit einer anderen, aber gleichförmigen Geschwindigkeit die Erde umkreisen. Die Umlaufzeiten schwanken von 300 bis 3000 Jahren. Man hat bei der physikalischen Deutung dieser rotierenden Systeme an eine Rotation der Erdschale gegen den Erdkern gedacht.

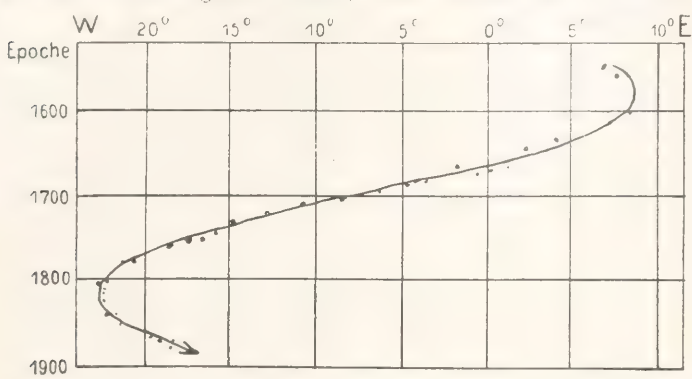


Fig. 4. Säkularänderung der Deklination in Paris von 1540 bis 1885.

Nach L. A. Bauer beschreibt das Nordende einer frei aufgehängten Magnetnadel bei der Säkularvariation infolge der Aenderung der Deklination und Inklination eine ovale Kurve, die von Ort zu Ort verschieden ist, aber auf der ganzen Erde im Uhrzeigersinn durchlaufen wird. Fast dieselbe Kurve, die das Nordende einer Magnetnadel infolge der Säkularvariation an einem Orte beschreibt, durchläuft sie auch, wenn man sie auf dem Breitenkreis dieses Ortes um die Erde führt, infolge der Aenderung von D und I von Längengrad zu Längengrad. (Man muß hierbei von der täglichen Variation absehen.) Es scheint also, daß die Säkularvariation infolge einer Rotation des permanenten Feldes um die Erde zustande kommt. Ein weiterer Beitrag zur Säkularvariation kann dadurch geliefert werden, daß bei fortschreitender Abkühlung der Erde die Permeabilität derselben steigt. Jedoch scheint dieser Einfluß nicht sehr groß zu sein.

Leyst hat neuerdings gezeigt, daß eine Abhängigkeit der Säkularvariation von dem Fleckenzustand der Sonne besteht. Man muß annehmen, daß die ionisierende Wirkung der Sonnenstrahlung auf die Erdatmosphäre mit der im Fleckenzustand charakterisierten Sonnentätigkeit schwankt, damit also auch die elektrische Leitfähigkeit der Atmosphäre. Da das permanente Feld f einen Anteil enthält, der durch elektrische Ströme in der Atmosphäre erzeugt wird, (wenn nicht gar das gesamte Feld f durch direkte Wirkung und Induktionswirkung dieser Ströme in der Erde entsteht), so ist eine Abhängigkeit seines variablen Teiles E hiervon gut möglich. Leyst fand als jährlichen Betrag der Säkularvariation der Deklination:

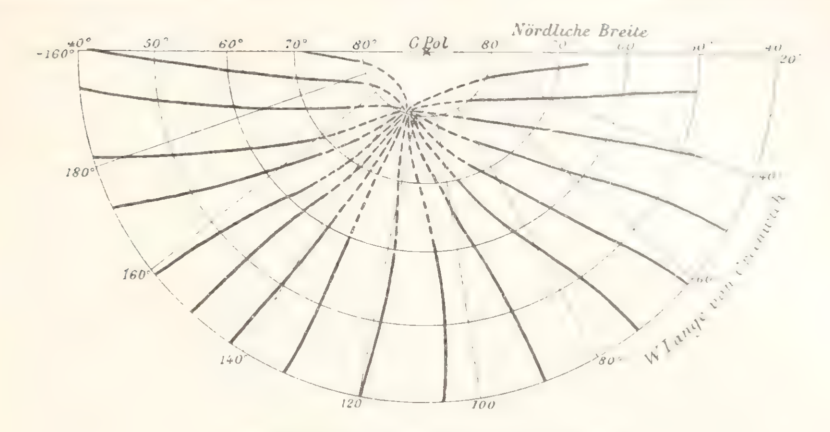
	Zeit des Flecken-maximums	Minimums
Potsdam	5′,14	4′,12
Pawlowsk	5′,02	3′,87

β) **Das tägliche Variationsfeld T.** Die sonnen- und mondtägliche Variation ist verschieden von Ort zu Ort und ändert sich am selben Ort im Laufe des Monats des Jahres, eines 11jährigen Zeitraumes, und zwar sowohl in der Amplitude, als auch im Charakter.

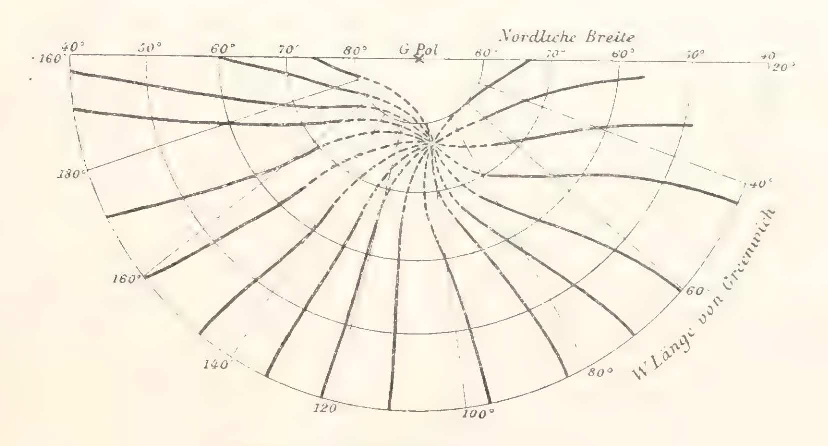
Figur 5 zeigt die sonnentägliche Variation von D, H, Z (wobei ΔD als Variationskraft in γ gemessen ist) in ihrer Abhängigkeit von der geographischen und magnetischen (ausgedrückt durch I) Breite zur Zeit der Aequinoktien.

Die Daten stammen leider aus verschiedenen Epochen, was ihre Vergleichbarkeit beeinträchtigt.

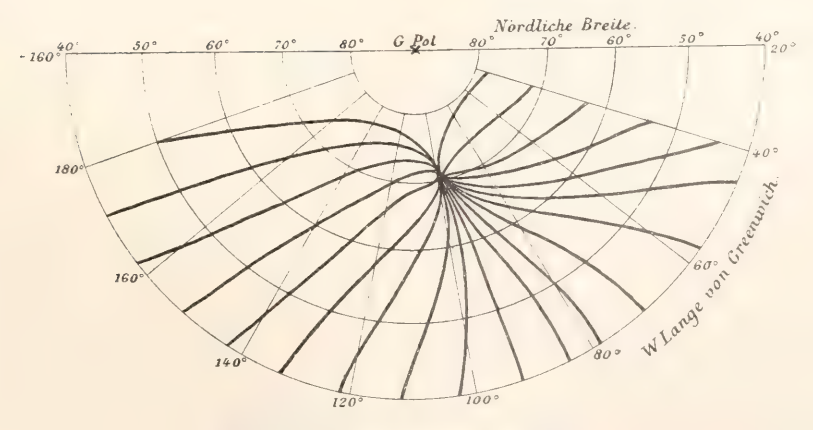
Figur 6 zeigt die tägliche Variation für die verschiedenen Jahreszeiten, und zwar für Samoa, das wegen seiner insularen und



Magnetische Meridiane für 1600.



Magnetische Meridiane für 1700.



Magnetische Meridiane für 1885.

Fig. 4a.

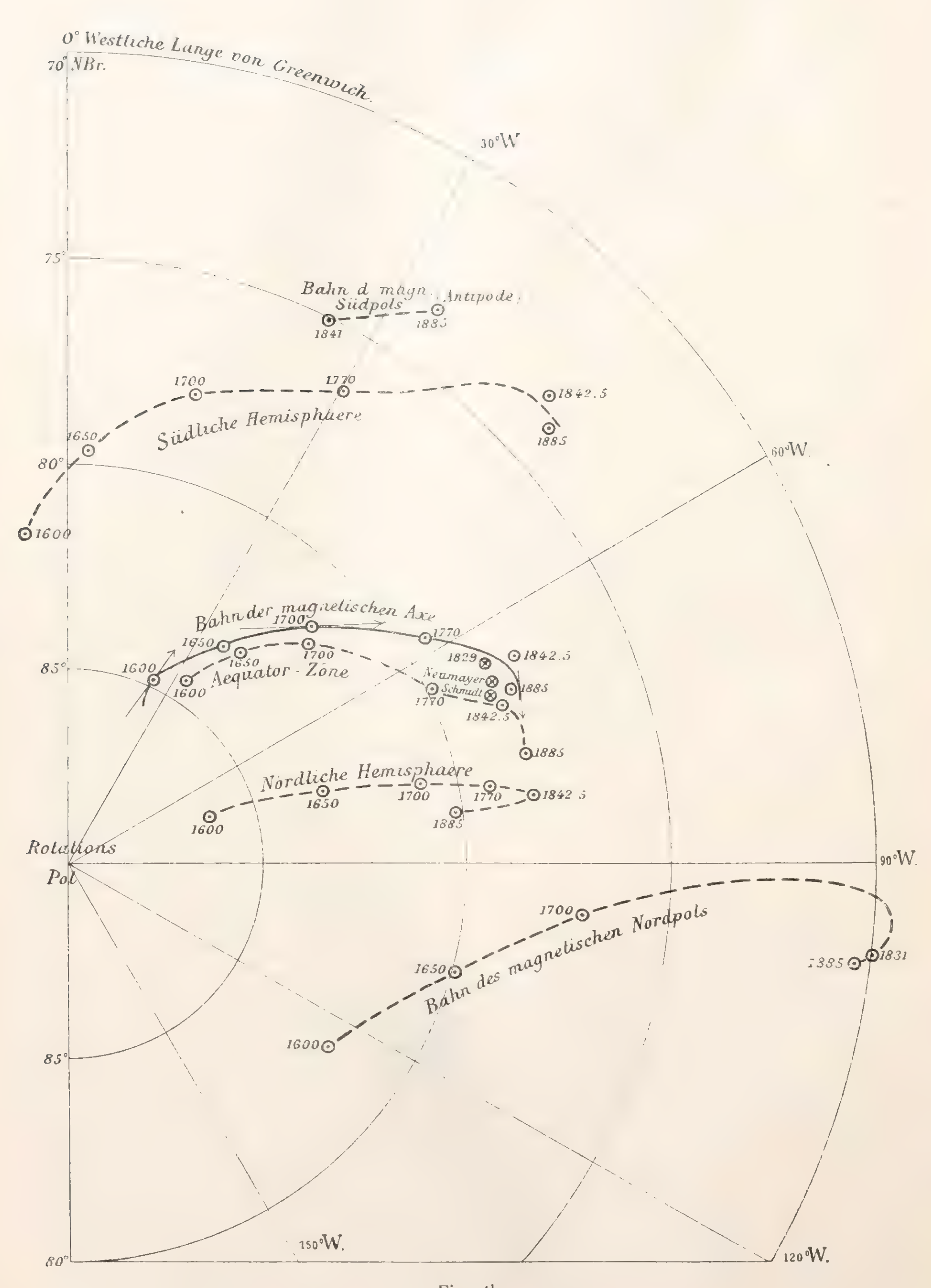

0° Westliche Lange von Greenwich.
70° NBr.
30°W
75°
Bahn d. magn. Südpols
Antipode
1841
1885
1700
1770
1842.5
1885
1650
Südliche Hemisphaere
80°
1600
60°W.
Bahn der magnetischen Axe
1700
1770
1650
1842.5
1829
1600
1650
1700
85°
Aequator - Zone
1600
Neumayer
Schmidt
1885
1770
1842.5
1885
Nördliche Hemisphaere
1650
1700
1770
1842.5
1600
1885
Rotations Pol
90°W.
1700
Bahn des magnetischen Nordpols
1650
1885
1831
1600
85°
150°W.
80°
120°W.

Fig. 4b.

tropischen Lage besonders regelmäßigen Verlauf zeigt.

Hier wie auch später bedeutet ein Steigen der Kurve für D ein Wandern des Nordendes der Nadel nach E, für H und Z eine Zu-

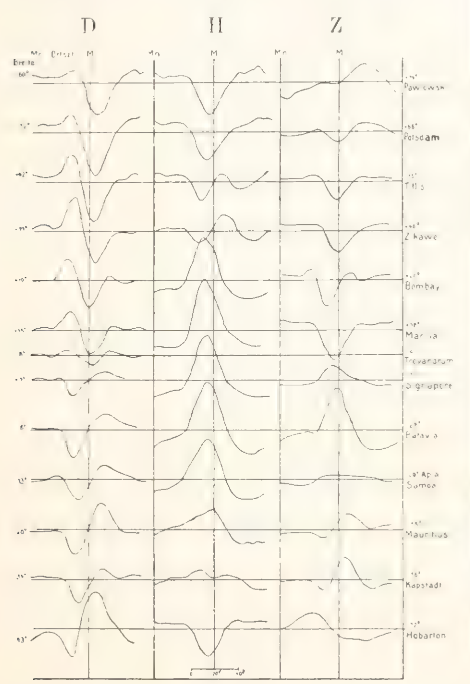


Fig. 5. Tägliche Variation der erdmagnetischen Elemente zur Äquinoktialzeit ($1^{mm} = 6\gamma$).

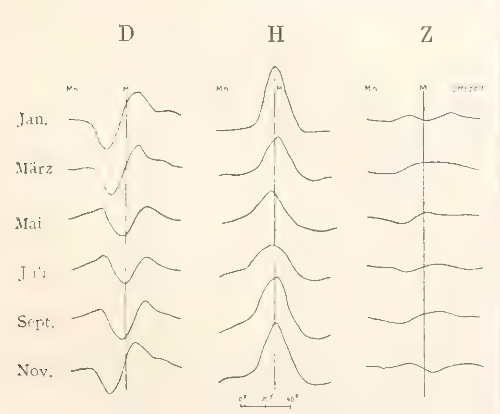


Fig. 6. Täglicher Gang der erdmagnetischen Elemente in Apia, Samoa ($1^{mm} = 6\gamma$).

nahme der auf das Nordende der Nadel wirkenden Kraft.

Eine andere Art der Darstellung, die die gleichzeitige Aenderung von D und I darstellt, zeigt Figur 7. Es ist die Bewegung des Nordendes der Nadel im Laufe des Tages, gesehen von einem Beobachter, der parallel zur Richtung des Feldes schaut. Die jahreszeitliche und geographische Abhängigkeit ist ersichtlich.

Zur theoretischen Betrachtung ist die Darstellung der Bewegung des Nordendes der Nadel bezogen auf ein astronomisch orientiertes System mit NS und EW-Achse besonders geeignet. Man trägt in dieses System die Aenderung $\varDelta X$ und $\varDelta Y$ von Stunde zu Stunde ein und verbindet die so gewonnenen Punkte zu einem Vektordiagramm (Fig. 8). Würde auf eine in horizontaler Ebene drehbare Nadel nur das tägliche Variationsfeld wirken — das permanente Feld muß man sich aufgehoben denken —, so würde sich die Nadel jeden Augenblick in die Richtung des Radiusvektors im obigen Vektordiagramm einstellen und in dieser Lage mit einer der Länge des Radiusvektors proportionalen Kraft festgehalten werden. Das Diagramm ist astronomisch orientiert. Wenn also die tägliche Bewegung der Magnetnadel durch ein Kräftesystem entstanden ist, das die Erde im Laufe eines Tages einmal, ohne Veränderung zu erleiden, umkreist, so muß das Diagramm für alle Punkte desselben Parallelkreises dieselbe Gestalt haben. Dies trifft nicht ganz zu, wie Figur 9 für zwei Stationen fast gleicher Breite für Juni 1890 zeigt; ein Teil des täglichen Variationsfeldes muß also örtlich bedingt sein.

Figur 8 zeigt die Vektordiagramme (X, Y) für Juni und Dezember in ihrer Abhängigkeit von der geographischen Breite. Kraft und Geschwindigkeit der Bewegung ist zur Tagzeit und im Sommer groß, zur Nachtzeit und im Winter klein. Zwischen 40° und 30° nördlicher und südlicher Breite tritt eine Umkehr der Bewegungsrichtung ein. Bei aufgehobenem permanenten Magnetismus zeigt der Radiusvektor, also auch das Nordende (d. i. der Südpol) der Nadel in Cheltenham (+30°B.) um ca. 11a nach Süden, in Honolulu (+21°B.) um dieselbe Ortszeit nach Norden. Zwischen beiden Breitengraden liegt also um Mittag ein Nordpol (oder ein ihm äquivalentes Stromsystem), das die Nordenden (Südpole) der Nadeln in Cheltenham und Honolulu anzieht; und zwar kommt der Nordpol, wie die Bewegungsrichtung des Radiusvektors um diese Zeit zeigt, von E hergezogen. Räumlich und zeitlich weniger gut abgegrenzt zieht auf der Nordhalbkugel um Mitternacht in derselben Breite ein Südpol vorbei. Auf der Südhalbkugel liegt in ähnlicher Breite um Mittag ein Süd-, um Mitternacht ein Nordpol. Wenn diese Effekte durch Stromsysteme erzeugt werden, so können sie in der Erde oder in der Atmosphäre ihren Sitz haben. Da den täglichen Variationen ein Potential zukommt, so scheiden

für diese Frage die potentiallosen vertikalen Erdluftströme aus; ob die elektrischen Ströme aber oben oder unten sitzen, läßt sich aus dem Horizontaldiagramm nicht entscheiden, da Ströme, die oben im einen Sinne kreisen, denselben magnetischen Effekt haben würden, wie solche, die unten im entgegengesetzten Sinne fließen. Berücksichtigt man aber gleichzeitig die Vertikalkomponente, so sieht man, daß das Nordende der Nadel (der Südpol) zur selben Zeit, wo es in $+39^\circ$B nach Süden und in $+20^\circ$B nach Norden zeigt, an beiden Orten nach oben zeigt, d. h. der sekundäre magnetische Nordpol zieht oberhalb, in der Atmosphäre, vorbei. Er wird also durch elektrische Ströme erzeugt, die ihn gegen den Uhrzeiger umkreisen.

Die Figur 10 zeigt die aus der Rechnung gewonnene Verteilung der Magnetpole des täglichen Variationsfeldes für Greenwicher Mittag. Die Kurven sind die Gleichgewichtslinien des Potentials des täglichen Variationsfeldes. Ihnen entsprechen die Strömungslinien der elektrischen Stromsysteme. Die Wirbelzentren dieser Stromsysteme liegen alle 4 auf den Roßbreiten, der Grenze des Passatkreislaufes und der beiden großen Windwirbel, welche die Erdpole umkreisen. Die Stromwirbel der Tagseite sind besser

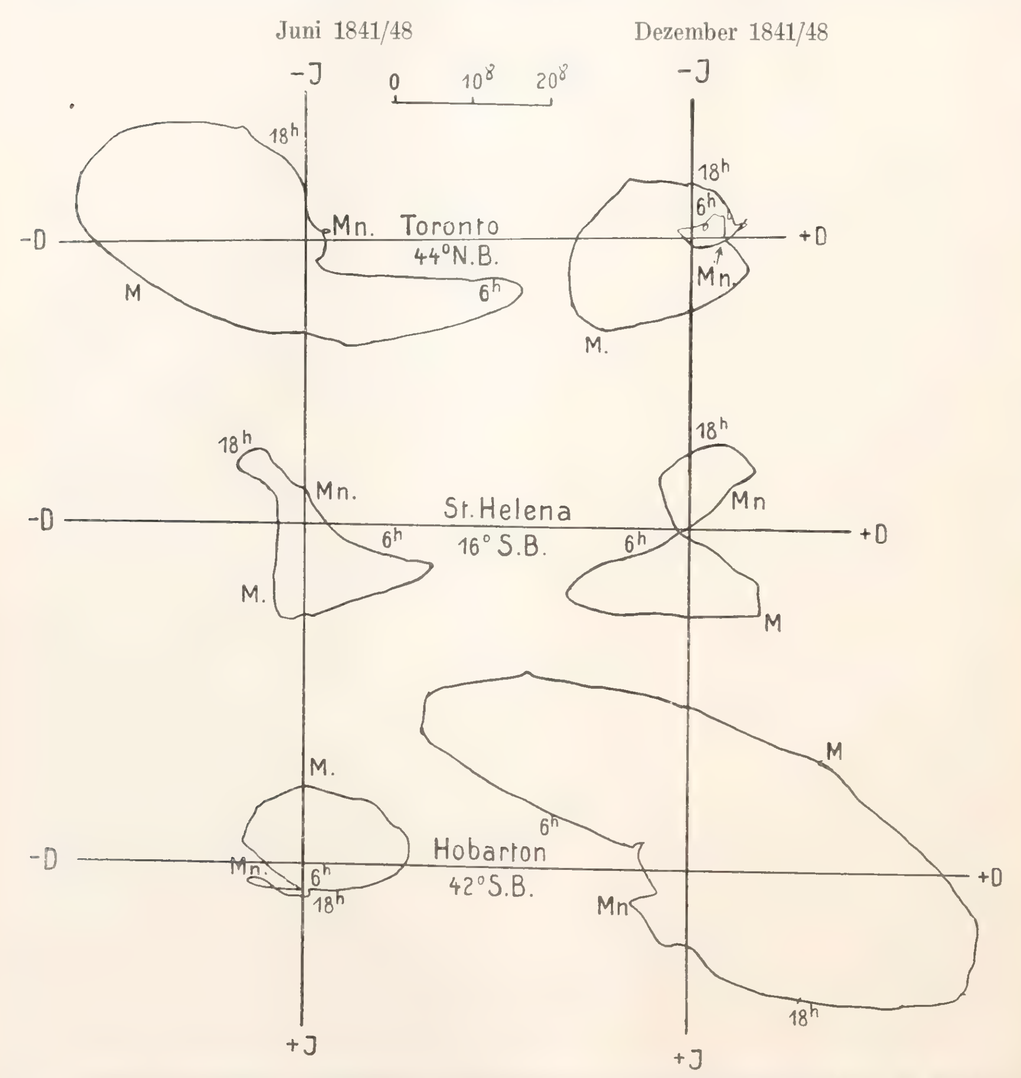


Fig. 7. Täglicher Gang der Deklination und Inklination im Juni und Dezember (Mn, 6h, M, 18h bedeuten die Tageszeiten).

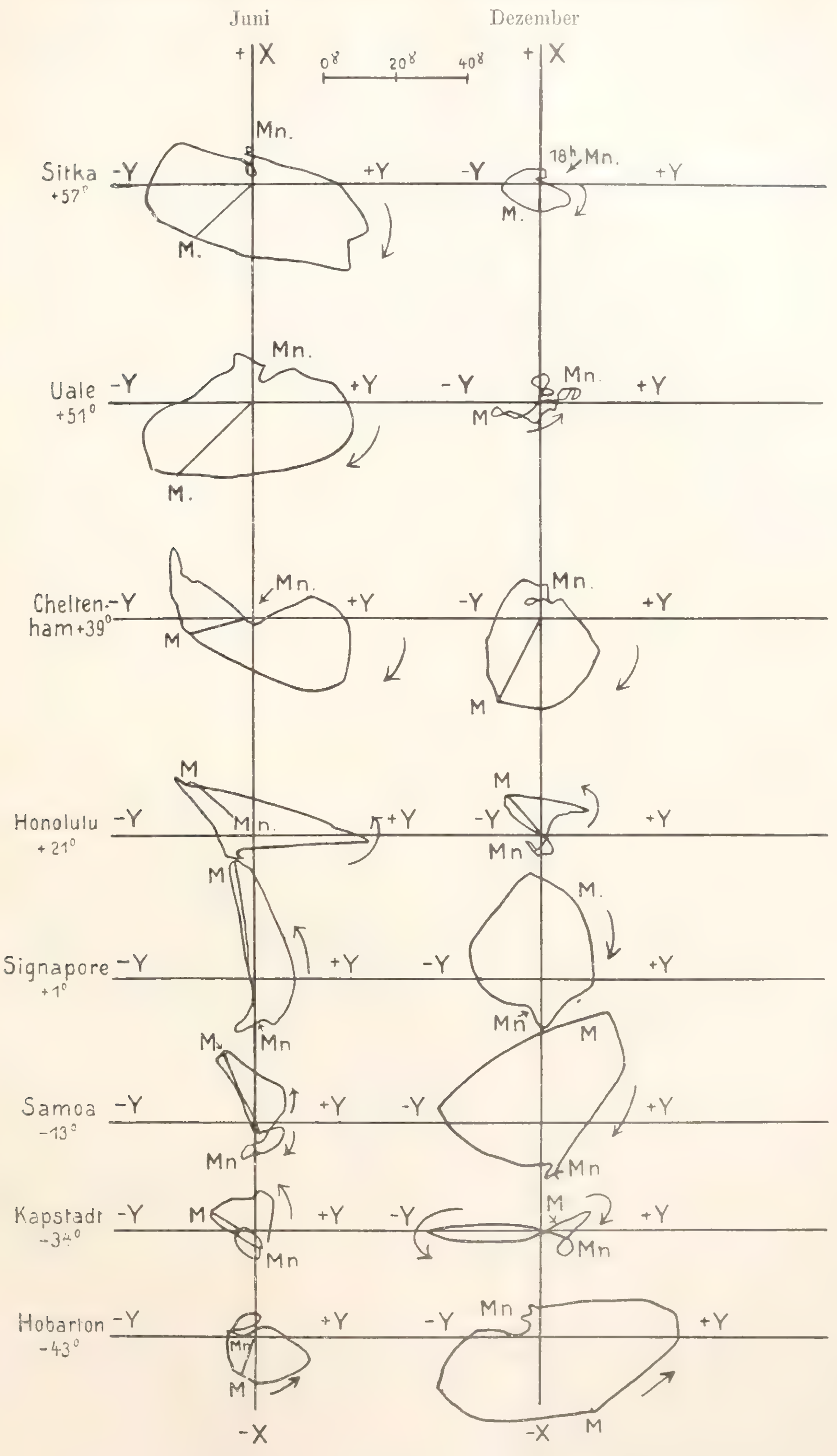


Fig. 8. Vektordiagramm der horizontalen erdmagnetischen Kraft (X, Y).

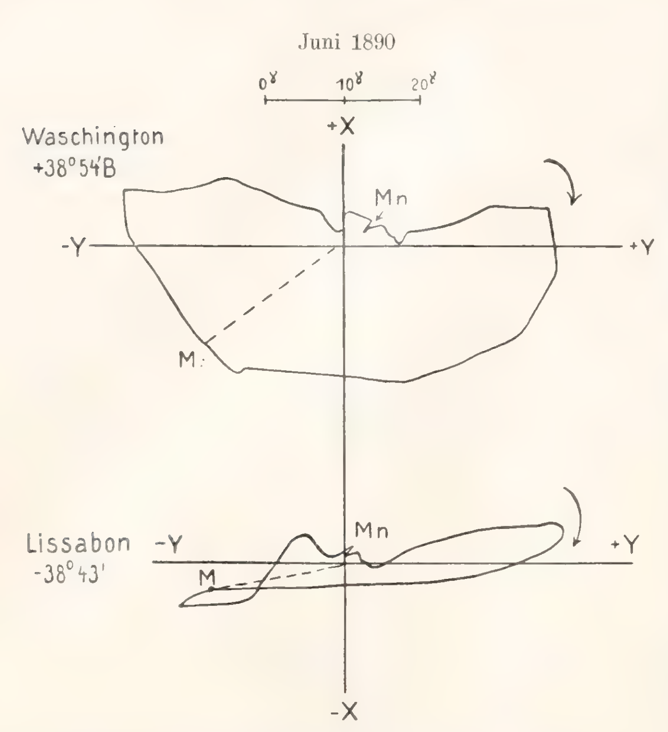


Fig. 9. Vectordiagramm X, Y für gleiche Breiten.

ausgebildet als die der Nachtseite; der Tagwirbel der Sommerhalbkugel ist stärker als der der Winterhalbkugel.

Harmonische Analyse. Eine weitere für theoretische Untersuchungen wichtige Darstellung des täglichen Ganges ist die durch trigonometrische Reihen von der Form:

$$c_1 \sin(\omega t + \alpha_1) + c_2 \sin(2\omega t + \alpha_2) + \ldots$$

wo t die von Mitternacht Ortszeit an gerechnete, in Stunden ausgedrückte Tageszeit bedeutet und ω zur Abkürzung für 15° steht. c ist die Amplitude, α der Phasenwinkel. Der Vorteil dieser Darstellung liegt darin, daß eine komplizierte periodische Erscheinung in eine Reihe von Sinusschwingungen von verschiedener Amplitude, Periode und Phasenzeit zerlegt wird. Die Perioden verhalten sich wie 1 : 2 : 3... Jede Sinusschwingung ist

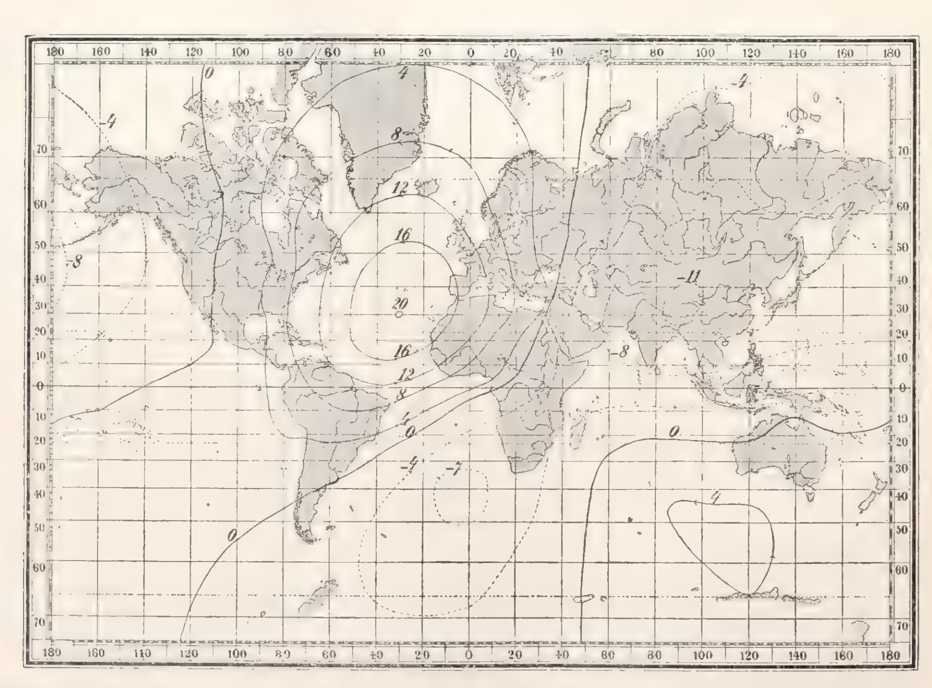


Fig. 10. Linien gleichen Potentiales der täglichen Variationen nach Fritsche. Gültig für 0^h p. m. Greenwicher mittl. Zeit (in Einheiten der 5. Stelle des C. G. S.-Systems). Aus Nippold, Erdmagnetismus (Sammlung Göschen)

so durch c und α und ihre Ordnung charakterisiert. Da die hohen Ordnungen erfahrungsgemäß von etwa der 4. an, weil sie klein gegen die ersten sind, an Bedeutung verlieren, so läßt sich die dargestellte komplizierte periodische Funktion schon durch 6 Zahlen c_1, c_2, c_3, α_1, α_2, α_3 genau überblicken.

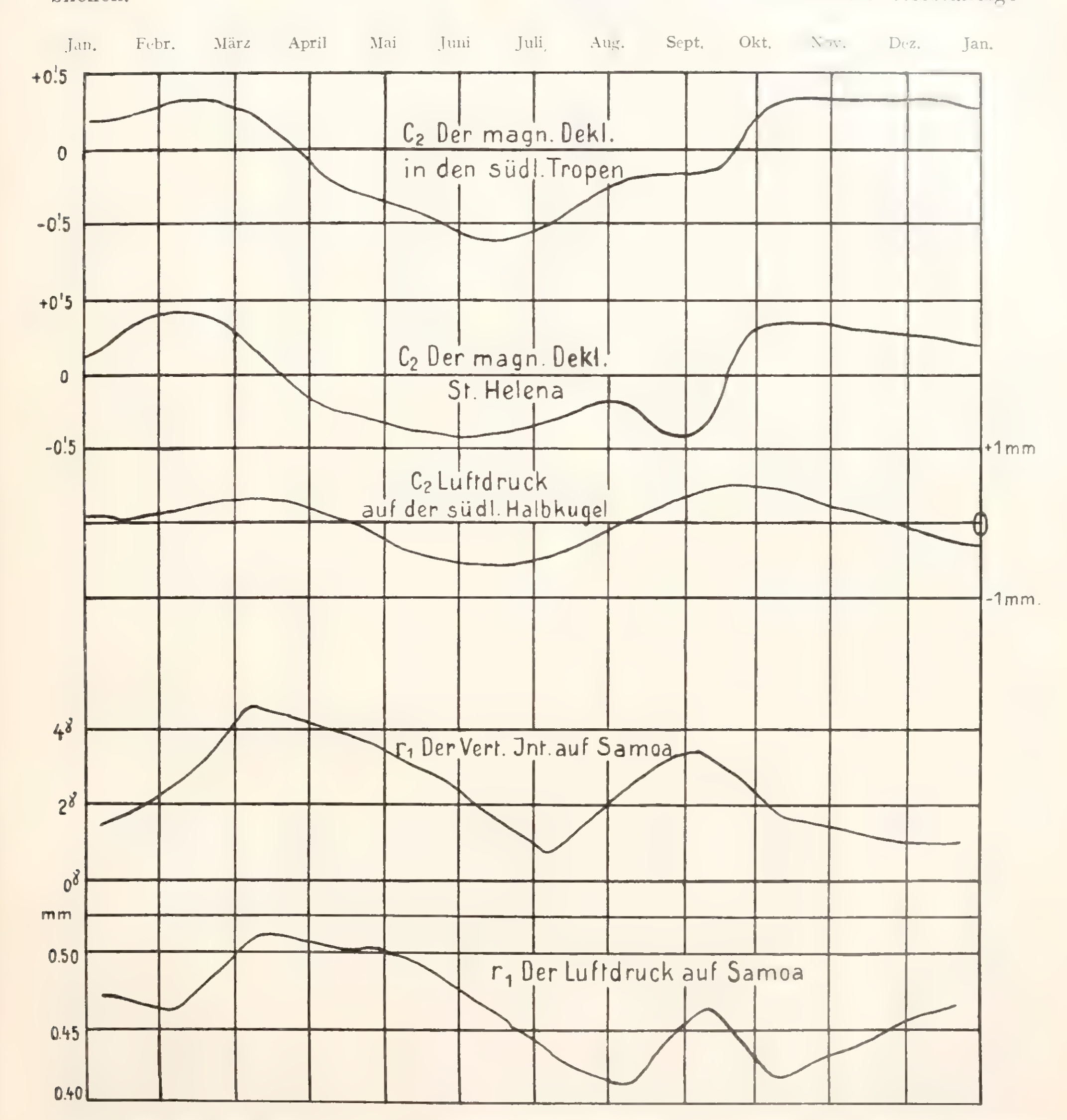


Fig. 11. Vergleich der harmonischen Konstanten für Luftdruck, Deklination und Vertikal-Intensität.

Dabei bedarf es einer besonderen Untersuchung, ob den so analytisch getrennten Einzelschwingungen selbständige physikalische Bedeutung zukommt, ob also das Gesamtphänomen durch Uebereinanderlagerung selbständiger Einzelphänomene von den betreffenden Periodenlängen zustande kommt, oder ob die harmonische Analyse in den Gliedern höherer Ordnung nur ein Maß für die Abweichung des dargestellten periodischen Vorganges von einer einfachen Sinusschwingung liefert (diese Abweichung kann z. B. auch von unzureichendem Material herrühren). Ergibt die Untersuchung, daß tatsächlich zwei oder mehrere selbständige Schwingungen existieren, so ermöglicht die harmonische Analyse die getrennte Betrachtung jeder einzelnen Schwingung, z. B. die Erforschung ihrer geographischen oder jahreszeitlichen Abhängigkeit.

In Figur 11 ist der jährliche Gang von c_2 (Koeffizient der halbtägigen Schwingung)

der Deklination und des Luftdruckes für St. Helena, ferner c_1 (Koeffizient der ganztägigen Schwingung) für die Vertikalintensität und den Luftdruck in Samoa dargestellt. Eine Parallelität im Verlauf der zusammengehörigen Partialschwingungen ist offenbar, im Verlauf der Gesamtphänomene dagegen ist eine solche nicht zu erkennen.

Abhängigkeit von der Sonnentätigkeit. Ebenso wie die Säkularvariation, jedoch in höherem Maße zeigt sich die tägliche Variation abhängig von der Tätigkeit der Sonne.

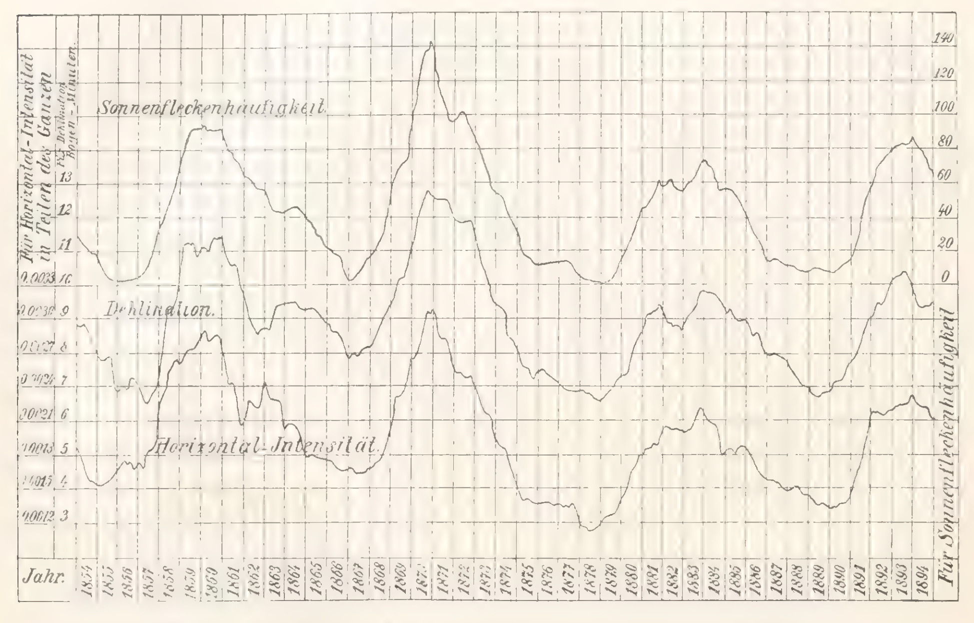


Fig. 12. Aus Nippold, Erdmagnetismus (Sammlung Göschen).

Figur 12 zeigt die Kurven der Sonnenfleckenrelativzahlen und der Amplitude der täglichen Variation für D und H für die Zeit 1841 bis 1896. Die Kurven zeigen große Aehnlichkeit und alle eine ca. 11jährige Periode. Die Schwankung der täglichen Amplitude von D und H im Lauf einer 11jährigen Periode kann 50% betragen. Man kann den Anteil der täglichen Variation, den diese Schwankung mit den Sonnenfleckenzahlen durchmacht, von dem restierenden trennen, indem man die tägliche Variation $\varDelta$ darstellt in der Form $\varDelta = \varDelta' + r\varDelta''$, wo r eine für die Sonnenfleckenzahl charakteristische Größe bedeutet ($^1/_{100}$ der Wolfschen Relativzahl R). Dadurch wird es möglich, die tägliche Variation auf einen mittleren Sonnenstand zu reduzieren, der durch $r = 0{,}5$ (mittlerer Wert für $\frac{R}{100}$ für das letzte Jahrhundert) charakterisiert ist. So reduzierte Zahlenreihen der täglichen Variation verschiedener Orte der Erde, die aus Zeiten verschiedener Sonnentätigkeit stammen, sind dann miteinander vergleichbar.

Eine Abhängigkeit der Variationen von der Rotation der Sonne hat man seit langem gesucht. Da die Rotationsdauer der Sonne mit der heliographischen Breite wächst, so weiß man nicht recht, welche Rotationsdauer man der Untersuchung zugrunde legen soll. Etwas Sicheres ist für die täglichen Variationen nicht ermittelt.

Tägliche Variation aus gestörten und ungestörten Tagen. Die Berechnung der täglichen Periode führt zu wesentlich anderen Ergebnissen, wenn man sie aus allen, oder nur aus störungsfreien Tagen ableitet.

Figur 13 zeigt dies für die Deklination in Dyrafjord, Island, Mai 1910 und für Deklination in Batavia, September 1883 bis 1899. In hohen Breiten sind die Unterschiede sehr groß, in niederen Breiten sehr gering. In arktischen Breiten kann sich die Umlaufrichtung des Radiusvektor im Vektordiagramm X, Y umkehren, wenn der tägliche Gang statt aus allen nur aus störungsfreien Tagen gewonnen ist.

Wenngleich die tägliche Variation eine bis zu gewissem Grade selbständige von den Störungen unabhängige physikalische Ursache zu besitzen scheint, und deshalb der

tägliche Gang aus störungsfreien Tagen dem gesuchten Phänomen am nächsten kommt, so liegt in der Ausscheidung der gestörten Tage, also in der Schätzung der Gestörtheit doch zuviel Willkür, als daß man die gestörten Tage aussondern könnte. Bei jeder Station müßte ein besonderer Betrag der Abweichung vom normalen Gang als gestört bezeichnet werden. Die internationale Kommission hat darum auch für gemeinsame Arbeiten die Bestimmung des täglichen Ganges aus allen Tagen in Vorschlag gebracht. Eine sinngemäße Trennung des gestörten und ungestörten Anteils wird am ehesten noch durch die oben beschriebene Zerlegung $\Delta = \Delta' + r\Delta''$ erreicht; denn die Gestörtheit schwankt parallel mit der Fleckenrelativzahl.

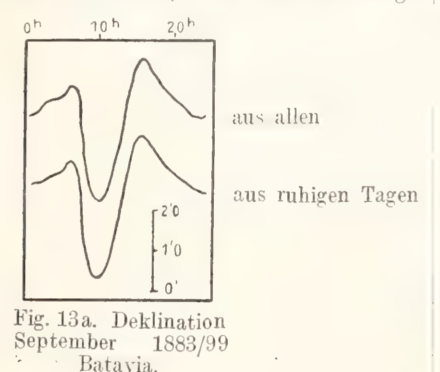


Fig. 13a. Deklination September 1883/99 Batavia.

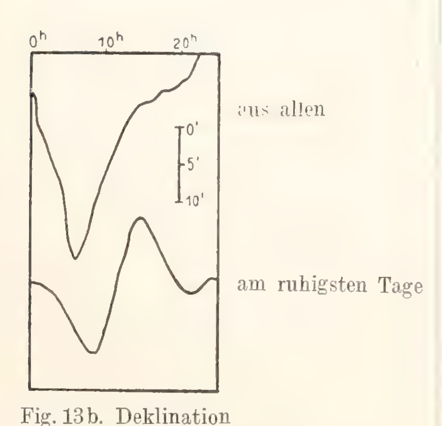


Fig. 13b. Deklination Mai 1910. Dyrafjord, Island.

Mondtägliche Variation. Analog der sonnentäglichen Variation existiert eine mondtägliche. Figur 14 zeigt diese für D, H, Z für Batavia. Figur 15 zeigt die mondtägliche Variation von D in ihrer Abhängigkeit von der Breite. Die Daten entstammen leider verschiedenen Epochen, was ihre Vergleichbarkeit beeinträchtigt. An allen Stationen herrscht eine halbtägige Periode vor, ähnlich einer normalen Gezeitenwelle.

Die Kurven der Nord- und Südhalbkugel verlaufen spiegelbildlich. Figur 16 zeigt die Abhängigkeit von der Jahreszeit.

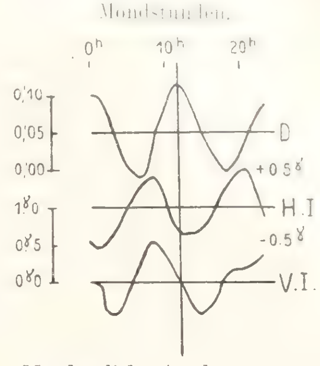


Fig. 14. Mondtägliche Aenderung von D, H, Z Batavia (1883 bis 1894).

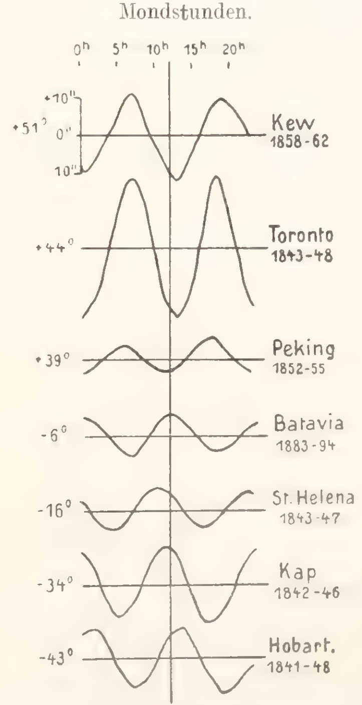


Fig. 15. Mondtägliche Aenderung der Deklination im Jahresmittel 1 mm = 2″.

Die mondtägliche Variation ist gleich stark, ob der Mond über oder unter dem Horizont steht; während der sonnentägliche Gang stark ist, wenn die Sonne über, schwach, wenn sie unter dem Horizont steht. Figur 17 zeigt die Aenderung der Deklination einer bestimmten Tagesstunde in Batavia in

ihrer Abhängigkeit von der Mondphase. Es entsprechen die 4 Kurven 4 verschiedenen Tageszeiten. In Kurve 1 sind als Ordinaten die Aenderungen der Deklination während der Zeit von 5^h—7^h (Ortszeit nicht etwa Mondzeit) für die verschiedenen Mondalter (Abszissen) eingetragen, also für 29 auf-

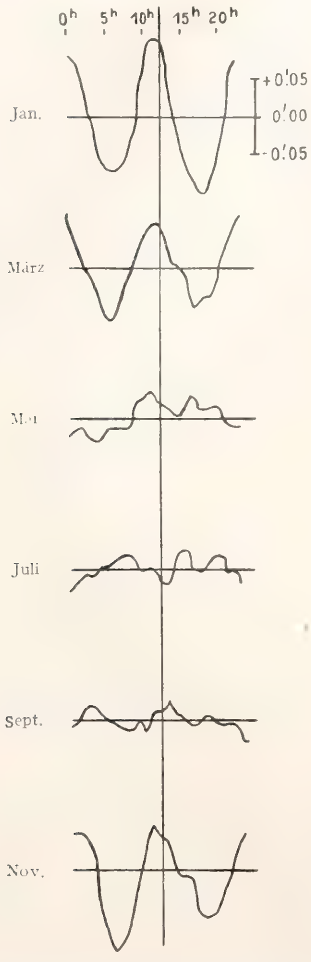


Fig. 16. Mondtägliche Aenderung der Dekl. in Batavia im Laufe des Jahres 1 mm = 0′.01.

einanderfolgende Tage. Kurve 2, 3, 4 zeigen dasselbe für 11^h—13^h, 17^h—19^h und für die Nachtzeit 20^h bis 5^h. Da sich die Mondstunden langsam gegen die Tagesstunden verschieben, so stellt die Figur den mondtäglichen Gang dar (der aber außerdem noch eine etwaige monatliche Periode enthalten würde). Die 4 Kurven zeigen nun eine 5 bis 6mal größere Amplitude, wenn sie aus Stunden zur Mittagszeit, als wenn sie aus Stunden zur Nachtzeit abgeleitet werden; d. h. auch die mondtägliche Variation ist zur Zeit, wo die Sonne über dem Horizont steht, größer als zur Nachtzeit.

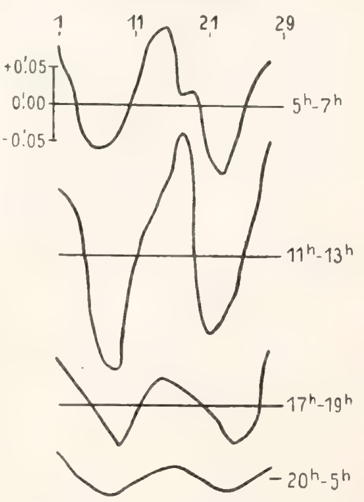


Fig. 17. Aenderung der Deklination in Batavia mit dem Mondalter für 4 verschiedene Tageszeiten 1 mm = 0′.01.

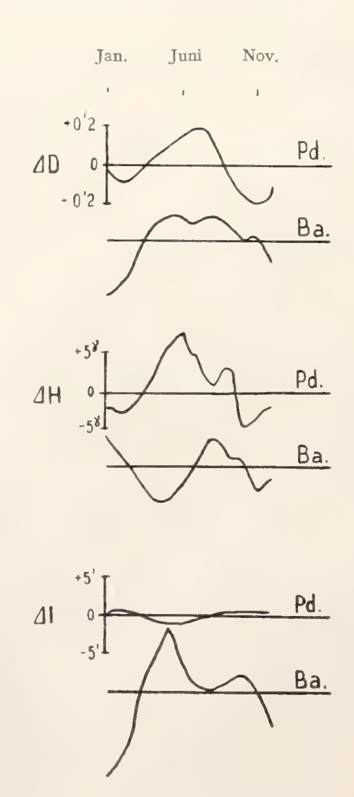


Fig. 18. Jahreszeitl. Aenderung der magnetischen Elemente in Potsdam und Batavia.

Die Amplitude der mondtäglichen Variation ist reziprok proportional dem Kubus der Distanz Mond—Erde. Das Verhältnis der Amplituden im Perigäum und Apogäum beträgt zu Trevandrum 1,24, Batavia 1,234. Das entsprechende Verhältnis der Kuben der Distanz $1{,}07^3 = 1{,}225$.

Außer der sonnen- und mondtäglichen Variation sind im Vektor T noch die jährlichen enthalten, d. i. der jährliche Gang der Monatsmittel. Figur 18 zeigt diesen für Potsdam und Batavia.

Theorie des Variationsfeldes T. Wie beim permanenten Feld kann man auch dem täglichen Variationsfeld ein Potential zuschreiben. Daraus folgen zwei wichtige Sätze; einmal kann aus dem Verhalten einer Komponente das Verhalten der anderen berechnet werden; ferner kann man ebenso wie beim permanenten Feld innere und äußere Kräfte trennen. $^3/_4$ der Gesamtvariation ist hier durch äußere Kräfte verursacht, $^1/_4$ durch Ströme, die von den äußeren Strömen im Erdboden induziert sind. Diese induzierten Ströme streben die tägliche Amplitude von Z zu vermindern, die von H zu vergrößern. Die beobachtete Variation ist die algebraische Summe der Wirkungen beider Kraftsysteme, des äußeren primären und des inneren, induzierten, jedoch besitzt das induzierte eine Phasendifferenz gegen das primäre, wodurch die Resultate beider eine Verzögerung gegen das primäre erleiden.

Dies widerspricht jedoch der Erfahrung, da eine solche Verzögerung in der Vertikalkomponente nicht beobachtet wird.

Dies kann veranlaßt sein durch eine zum Erdmittelpunkt hin wachsende elektrische Leitfähigkeit (Lamb). Die seismischen Beobachtungen führen zur Annahme eines Eisenkernes im Erdinnern, der eine gesteigerte Leitfähigkeit dort wahrscheinlich macht.

Erdströme. Ein Teil der inneren Ströme, nämlich der, der in der obersten Erdrinde verläuft, ist nun der direkten Messung zugängig, in dem man an zwei Orten Metallplatten in die Erde versenkt und den im Verbindungsdraht fließenden Strom mißt. Sind die Orte einigermaßen weit voneinander entfernt (etwa 100 km), so zeigt dieser Strom regelmäßige tägliche Schwankungen, die zu den erdmagnetischen täglichen Variationen in einer bestimmten Beziehung stehen. Die WE-Komponente des Erdstromes besitzt eine tägliche Aenderung, die derjenigen von X parallel läuft und Extreme zur selben Zeit hat. Dies deutet an, daß die tägliche Aenderung des WE-Stroms die Ursache derjenigen von X ist, da ja das Magnetfeld eines Stromes proportional der Stärke des Stromes ist. Die genauere Untersuchung durch Trennung innerer und äußerer Kräfte zeigte, daß äußere Ströme den Hauptanteil liefern, also wahrscheinlich die primären sind, die die inneren durch Induktion veranlaßt haben. Die täglichen Aenderungen der NS-Komponente des Erdstromes dagegen ist nicht parallel der von Y, sondern der NS-Erdstrom ist am stärksten, wenn Y sich am schnellsten ändert, d. h. physikalisch: Die Aenderungen von Y erzeugen die des NS-Erdstromes durch Induktion.

Die Gestalt des äußeren Stromsystems ist in der Karte der Aequipotentiallinien der täglichen Variation dargestellt. Es bleibt noch übrig, den physikalischen Ursprung der äußeren primären Ströme zu erklären. Die größte Wahrscheinlichkeit hat hier die Ansicht von Schuster, daß die obigen elektrischen Ströme durch die Vertikalkomponente des permanenten Feldes in die infolge von Gezeiten und Druckschwankungen horizontal oszillierende Atmosphäre induziert werden. Sonne und Mond veranlassen Gezeitenströmungen in der Atmosphäre, die täglichen Schwankungen des Luftdrucks geben ebenfalls Veranlassung zu horizontalen Bewegungen. Hierdurch werden Luftmassen gegen die Kraftlinien des permanenten Feldes geführt; da die Luftmassen elektrisch leitend sind, müssen in ihnen dabei elektrische Ströme induziert werden. Für diese Theorie spricht, daß die halbtägige Barometeroszillation eine halbjährliche Periode besitzt, die mit derjenigen der Deklination gut übereinstimmt, Maxima zu den Aequinoktien, Minima zu den Solstitien. Siehe auch Figur 11. Schuster behandelt die ganz- und halbtägige erdmagnetische Variation getrennt und findet, daß jede von beiden durch eine Schwingung in der Atmosphäre veranlaßt wird, die von derselben Natur ist wie diejenigen, welche den täglichen Luftdruckgang hervorrufen.

Die Vektordiagramme gleicher Parallelkreise (s. Fig. 9) zeigen zuweilen Unterschiede, die jetzt verständlich werden, da ja jetzt die tägliche Variation durch ein Stromsystem erklärt wird, das durch eine auf demselben Breitengrad mit der Länge variable Ursache erzeugt wird, nämlich durch die Kraftliniendichte und -Richtung. Diese kann von Ort zu Ort auch auf demselben Breitengrad variieren, da ja Drehachse und Magnetachse der Erde gegeneinander geneigt sind.

Eine weitere Stütze findet die Theorie in den mondtäglichen Aenderungen, in denen sich die Mondgezeiten der Atmosphäre abbilden.

Außer von den Bewegungen der Luft

und der Verteilung der Kraftlinien des Erdfeldes, hängen die Intensität der Induktionsströme von der Leitfähigkeit der Atmosphäre ab. Die Rechnung zeigt, daß die Leitfähigkeit der unteren Schichten der Atmosphäre viel zu klein ist, um Induktionsströme von der erforderlichen Größe zu ermöglichen. Selbst unter Voraussetzung, daß die im Ballon beobachtete Zunahme der Leitfähigkeit sich bis zur Höhe von mehreren 100 km extrapolieren ließe, würde diese mmer noch nicht ausreichen; statt der erforderlichen Leitfähigkeit würden wir dort eine etwa 10^5 mal kleinere haben. Man muß daher einen Ionisator annehmen, der in der oberen Atmosphäre stärker wirkt, als in der unteren; dies sollen die unten stark absorbierten ultravioletten Strahlen sein. Einleuchtend ist dann die Wirkung der Sonne auf die tägliche Variation. Ihre ionisierende Kraft ist tagsüber und im Sommer groß, nachts und im Winter klein und abhängig von dem Winkel, unter dem die Sonnenstrahlen die Atmosphäre treffen. Beobachtungen bei Sonnenfinsternissen scheinen zu zeigen, daß die tägliche Variation während der Finsternis den Gang annimmt, den sie zur Nachtzeit zeigt.

Die ionisierende Kraft der Sonne ist während der Finsternis abgeblendet. Die Parallelität des Ganges der täglichen Amplituden mit den Sonnenfleckenzahlen hat nichts Unerklärliches mehr, da man in diesen Zahlen sehr wohl ein Maß für die Aktivität der Sonne, für ihre ionisierende Kraft erblicken kann (siehe unter Störungen).

Zusammenfassung. T ist also abhängig 1. von der Gestalt des Kraftliniensystems der Erde, was in der Abhängigkeit von Länge und Breite zutage tritt; 2. abhängig von den Bewegungen der Luft, also von den durch die Wärmewirkung der Sonne erzeugten Luftdruckwellen und von Gezeitenwellen der Luft; 3. von der ionisierenden Kraft der Sonne, also von der Tageszeit, Jahreszeit und der Sonnenfleckenzahl.

γ) Das Störungsfeld A. Magnetische Störungen nennt man die unregelmäßige, oftmals plötzlich und heftig auftretenden Schwankungen der Magnetnadel. Zwischen diesen großen Störungen und dem regelmäßigen Verlauf gibt es alle Uebergangsstufen. Dem Aussehen nach lassen sich hauptsächlich 3 Typen unterscheiden. 1. Die großen Störungen (s. Fig. 19); diese beginnen mit einer plötzlichen für die ganze Erde gleichzeitigen oder nahezu gleichzeitigen Bewegung, danach folgen einige Stunden heftiger Schwingungen; dann erst kehren die Nadeln langsam, oft erst nach mehreren Tagen in ihre Ruhelage zurück. 2. Die mäßigen Störungen. Es sind in mittleren und niederen Breiten meist einseitige Ausbuchtungen der Registrierkurve von 1 bis 2 Stunden Dauer, nach denen die Nadel wieder ihre normale Lage erreicht, ohne daß eine Nachstörung auftritt; ihre Maxima

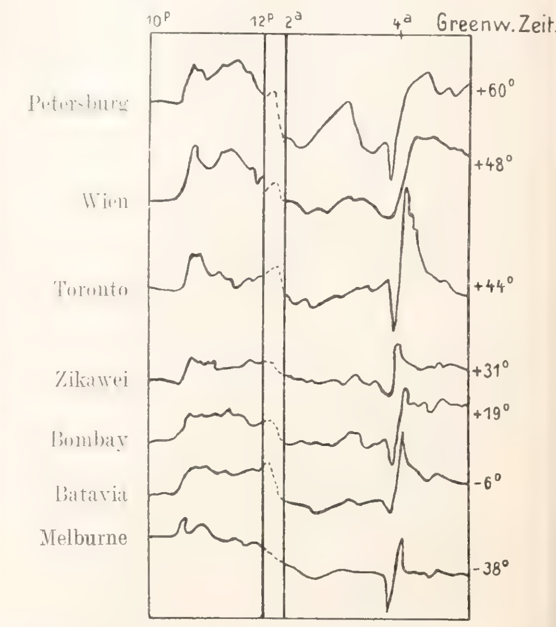


Fig. 19. Erdmagnetische Störung vom 24.—25. Juli 1885. Amplitude in Toronto 470*γ*, in Wien 120*γ* (Maßstab bei den einzelnen Stationen verschieden).

treten nicht gleichzeitig an allen Orten, sondern oft zeitlich stark verschoben auf, sie wiederholen sich oft mehrere Tage hintereinander zu angenähert gleicher Zeit in wenig veränderter Form. 3. Elementarwellen, Pulsationen (s. Fig. 20). Regelmäßige

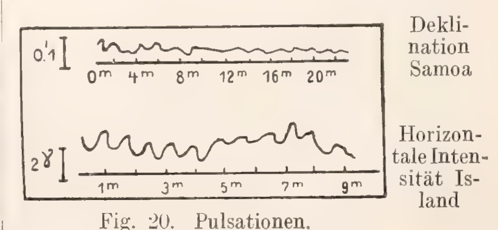


Fig. 20. Pulsationen.

Sinuswellen von kurzer Periode, etwa 0,1 Min. bis 2 Min. und geringer Amplitude, die oft mit geringen Unterbrechungen stundenlang anhalten. Bei den großen Störungen kann man drei Phasen gut unterscheiden. 1. Die Einsatzphase, die aus ein paar heftigen Bewegungen von geringer Amplitude besteht; denen als 2. Phase bald die Hauptausschläge folgen. Als 3. Phase kann man

die oft tagelang dauernde Rückwanderung in die Ruhelage bezeichnen.

Nach der geographischen Breite kann man Störungen unterscheiden, die in den Tropen verhältnismäßig stärker ausgebildet sind, äquatoriale Störungen, und solche, die in höheren Breiten besonders stark auftreten, in den Tropen aber nur wenig Unruhe verursachen, polare Störungen. Diese beiden Typen können einzeln vorkommen, oder sich gleichzeitig überlagernd, oder dicht hintereinander folgend (siehe Fig. 21).

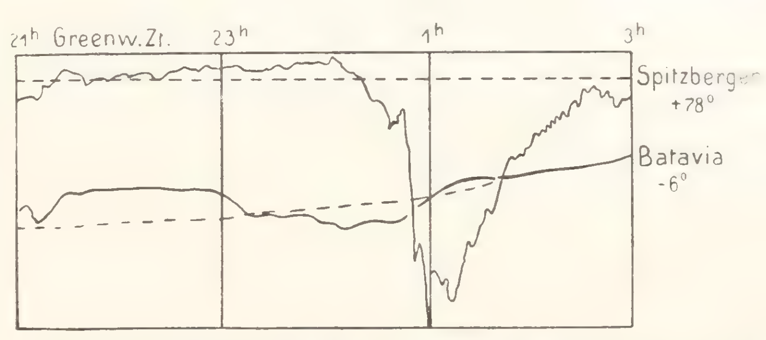


Fig. 21. Horizontale Intensität der Störung vom 31. März 1903. 1 mm = 3.5 γ nach oben wachsend. 21^h—23^h Aequatoriale, 0^h—3^h polare Störung — — — — — normaler tägl. Gang.

In den Störungen kann man Bewegungen unterscheiden, die für die ganze Erde nahe gleichzeitig und ähnlich verlaufen, und solche, die recht lokalen Charakter tragen; zu den ersten gehören die ersten Einsätze der Störungen und die großen hauptsächlichen Bewegungen (Fig. 19). Sie scheinen von Störungsgebieten herzurühren, die groß oder doch beträchtlich im Verhältnis zur Erde sind.

Zur zweiten Art gehören die häufigen unregelmäßigen Bewegungen der Magnetnadel, die zuweilen schon an recht benachbarten Orten (Potsdam-Seddin; siehe auch Fig. 22) entgegengesetzten Verlauf zeigen, denen also recht lokaler Charakter zukommt. Oftmals treten die letzten im Gefolge der ersten Art auf und scheinen wie Teildepressionen am Rande großer Cyklonen zu wandern.

Zeitliche Verteilung der Störungshäufigkeit. Diese weist eine Gesetzmäßigkeit auf im Laufe des Tages, des Jahres, eines etwa 29tägigen und eines 11jährigen Zeitraumes.

Tägliche Periode zeigt in den Tropen mittags ein steiles Maximum, nachts Ruhe; der Gang gleicht somit dem der horizontalen Kraft dort (Fig. 23).

In höheren Breiten ist tagsüber ein Minimum, nachts ein Maximum.

Der jährliche Verlauf zeigt Maxima zur Zeit der Aequinoktien, das Hauptminimum im Juni (Fig. 24).

Der 11jährige Verlauf ist parallel dem Verlauf der Sonnenflecken, dem auch die Polarlichter folgen (s. Fig. 12).

Ferner scheint eine nahezu 30tägige Periode vorhanden zu sein, die mit der synodischen Rotationsdauer der Sonne in etwa 30° heliographischer Breite übereinstimmt, wenigstens fallen von den 7 stärksten Störungen, die in Potsdam beobachtet wurden, 5 auf Tage, die um ein Vielfaches von 29.97 auseinanderliegen. Es scheint danach, daß bei der durch die Rotation der Sonne verursachten Wiederkehr bestimmter Aktionszentren der Sonne, die Wiederholung eines magnetischen Sturmes eintreten kann.

Pulsationen. Die Amplitude dieser kleinen regelmäßigen Sinuswellen ist in den hohen Breiten am stärksten und kann dort mehrere γ oder über 1′ betragen. In den Tropen sind sie in Z und D nur mit sehr empfindlichen Instrumenten nachweisbar, jedoch zweifellos zahlreich vorhanden.

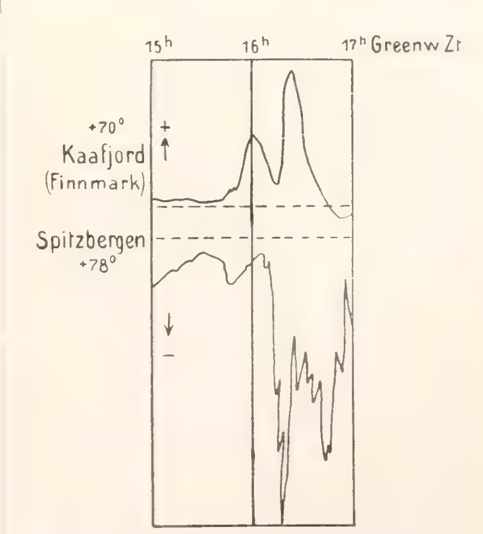


Fig. 22. Horizontale Intensität der Störung vom 15. II. 1903. 1 mm = 10 γ. Entfernung Kaafjord — Spitzbergen = 900 km.

Sie treten oftmals über ein großes Areal

der Erde fast gleichzeitig auf. Beobachtungen in Samoa und Batavia ergaben für gleiche Phasen Zeitdifferenzen von wenigen Sekunden (Größenordnung und Periode).

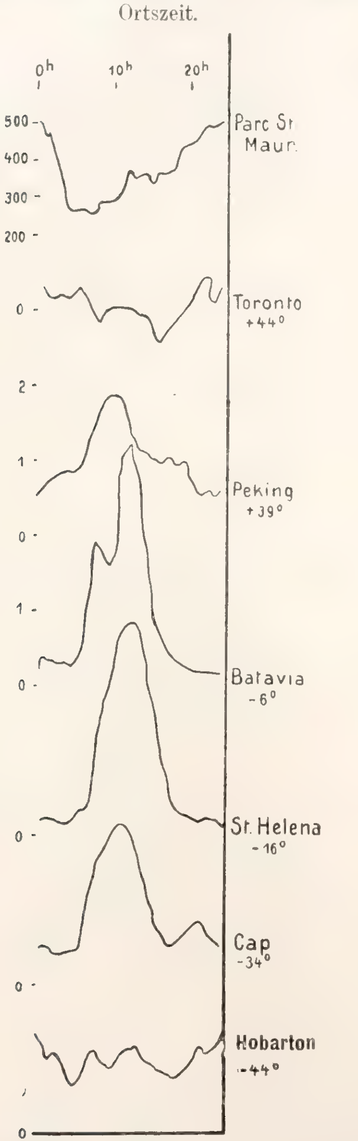


Fig. 23. Täglicher Gang der Störungshäufigkeit der Deklination.

Ihre Häufigkeit zeigt eine wohl für alle (?) Orte ähnliche tägliche Periode (Fig. 25) mit einem steilen Maximum um Mitternacht; ferner eine weniger gut ausgeprägte auch mehr von Ort zu Ort verschiedene jährliche Periode mit 2 Minima etwa im Mai und Dezember.

Theorie des Störungsfeldes A. Die Abhängigkeit des Feldes von der Tageszeit, von der Jahreszeit und von der Fleckenhäufigkeit legt die Vermutung nahe, daß in der Sonne die Ursache der Störung zu suchen ist. Gleichzeitig mit magnetischen Störungen

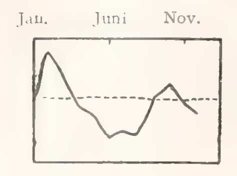


Fig. 24. Jährlicher Gang der Störungshäufigkeit der Deklination zu Potsdam.

auftretende Polarlichter weisen auf atmosphärische elektrische Ströme als Ursache hin. Wie beim Variationsfeld T wird man auch hier in der ionisierenden Tätigkeit der Sonne eine Bedingung für das Entstehen dieser Ströme erblicken müssen. Der tägliche Gang an gestörten und ungestörten Tagen

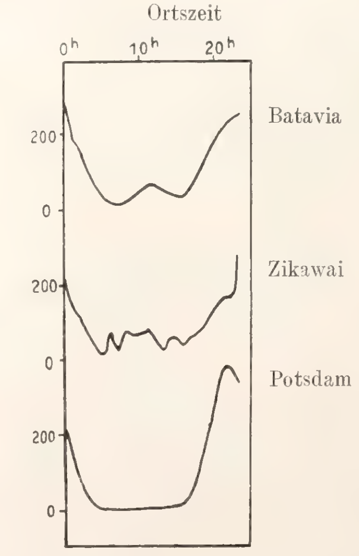


Fig. 25. Täglicher Gang der Pulsationen (Ordinate = Zahl der Stunden mit Pulsationen).

zeigt nun einen wesentlich anderen Verlauf. In Polargegenden kann sich der Umlaufsinn des Vektordiagramms sogar umkehren. Störungen in hohen Breiten, die sich oft mehrere Tage hintereinander wiederholen, zeigen ein außerordentlich ähnliches Bild. In Nordwestisland z. B. ein hohes Maximum von H bei Tage und ein steiles tiefes Minimum zur Nacht. Beide fehlen an ruhigen Tagen. Ferner ist die Größe der Störungsvektoren in besonderer Weise abhängig von der geographischen Breite, und zwar in anderer Weise wie die der Variationsfelder T. Bei polaren Störungen ist ein Maximum in polaren Gegenden, bei äquatorialen in den Tropen. Alles dies deutet darauf hin, daß wir es

bei den Störungen nicht nur mit denselben Stromsystemen zu tun haben, die die tägliche Variation veranlassen, und die bei Störungen nur eine Vertiefung erfahren infolge einer gesteigerten Ionisation der Atmosphäre. Vielleicht tritt auch dies ein, aber es ist nicht der Haupteffekt der Störung. Dieser liegt vielmehr in dem Auftreten neuer Stromsysteme, die auch an der Nachtseite der Erde liegen, in den Polargegenden sogar vorzugsweise.

Die starke Bevorzugung der Tagseite bei dem Variationsfeld T und die abblendende Wirkung des Mondes bei Sonnenfinsternissen legte die Vermutung nahe, daß bei T ein Ionisator wirkt, der sich von der Sonne aus gradlinig fortpflanzt, ohne Ablenkung im Erdfeld zu erfahren.

Bei den Störungen nun führt die besondere Abhängigkeit von der Breite und die in Polargegenden vorhandene Bevorzugung der Nachtseite zu der Anschauung, daß hier die von der Sonne kommende Ursache der Ausbildung atmosphärischer Stromsysteme im permanenten erdmagnetischen Felde eine Ablenkung erfährt. Die Berechnung der Bahnen elektrischer Teilchen im Magnetfeld der Erde, die durch Poincaré und Villard angebahnt, durch Störmer ausgebildet und durch Birkeland experimentell an einem magnetisierten Erdmodell in einem Kathodenstrahlbündel geprüft ist, führen zu einer Verteilung der elektrischen Teilchen, die mit der Verteilung der magnetischen Störungen über die Erde korrespondieren. Die Teilchen werden in Zonen eingesogen, die den Polarlichtzonen und einem Gürtel in der Aequatorgegend entsprechen. Diesen Zonen entsprechen die polaren und äquatorialen Störungen. Durch die Ablenkung, die die elektrischen Teilchen im Magnetfeld der Erde erfahren, können sie sehr wohl auf die Nachtseite der Erde gelangen. Die Teilchen bringen beim Anprall auf die obere Atmosphäre diese zum Leuchten; was wir als Polarlichter sehen; sie ionisieren dabei durch Stoß die Atmosphäre, erhöhen also ihre Leitfähigkeit.

Bewegungen dieser besonders stark leitfähigen Teile der Atmosphäre gegen die Kraftlinien des permanenten Feldes f erzeugen dort in der Atmosphäre Induktionsströme.

Andererseits sind die Bahnen der elektrischen Teilchen selbst äquivalent mit elektrischen Strömen. Die Frage ist nun, welches von beiden Stromsystemen, das der Induktionsströme oder der Strombahnen der elektrischen Teilchen, durch ihre magnetische Wirkung den Hauptanteil der Störung liefert? Eine quantitative Ueberlegung führt da wohl eher zur Vermutung, daß dies die Induktionsströme sind. Die Elektrizitätsmenge, die von der Sonne kommen müßte, wäre im anderen Falle gar zu groß. Auch spricht hierfür das oftmals recht ähnliche Bild bei verschiedenen Störungen an derselben Station, während schon bei benachbarten Stationen große Verschiedenheiten auftreten; solche Umstände scheinen auf eine fest mit dem Ort verbundene Ursache hinzudeuten, die dem Störungsbild das typisch lokale Gepräge verleiht, nämlich auf die induzierende Wirkung des örtlichen Kraftliniensystems. Immerhin kann die Frage noch nicht als erledigt gelten. Natürlich induzieren diese atmosphärischen Ströme bei einer Störung im Erdboden wieder Erdströme, die oftmals so heftig sind, daß sie in den Telegraphenleitungen erhebliche Störungen des normalen Betriebes veranlassen.

Es fragt sich nun noch, ob solche Teilchen wirklich von der Sonne ausgesendet werden. Hale hat durch die Beobachtung des inversen Zeemaneffektes in den Sonnenflecken Magnetfelder nachweisen können, die sich wohl nur durch Zirkulation negativer elektrischer Teilchen um die Flecken erklären lassen.

Am Rande der Flecken treten vorzugsweise die Fackeln auf, in denen wir emporgeschleuderte Gasmassen erkennen müssen. Es erscheint also durchaus wahrscheinlich, daß damit elektrische Teilchen weit in den Raum hinausgestoßen werden.

Die Parallelität der Störungshäufigkeit und Sonnenfleckenrelativzahl ist jetzt ohne weiteres einleuchtend. Wenn, wie man erwartete, sich nicht jede Störung einem besonderen Fleck zuordnen läßt, so liegt dies wohl daran, daß der Fleck doch nur ein unvollkommenes Kriterium für die Tätigkeit der Sonne ist. Wahrscheinlich sind die viel schlechter beobachtbaren Fackeln die aktiven Elemente, die die elektrischen Teilchen ausstoßen; die Flecken sind nur als mehr oder weniger regelmäßige Begleiterscheinungen der Fackeln ein nicht ganz zuverlässiges Maß für diese Vorgänge.

Bisher ist es noch nicht gelungen, bestimmten Vorgängen auf der Sonne (Ausbrüchen) bestimmte magnetische Störungsausbrüche zuzuordnen, aus deren zeitlicher Differenz man die Geschwindigkeit der Fortbewegung der störenden Ursache von der Sonne zur Erde berechnen könnte. Die bisherigen Versuche führen zu den widersprechendsten Geschwindigkeiten. Einmal glaubt man Gleichzeitigkeit dieser Vorgänge, das andere Mal bis über 50 Stunden Differenz beobachtet zu haben. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Störungsausbrüche auf der Erde von einer ~~Rotation~~ Station zur anderen beobachtet, soll etwa 200 km/sec betragen, doch sind die vorliegenden Beobachtungen nicht von

der Schärfe, daß man diese Frage als entschieden ansehen könnte. Für die Erkenntnis der physikalischen Natur der Störung ist diese Frage sehr wichtig.

Die räumliche Verteilung der elektrischen Stromsysteme, die die Störungen veranlassen, ist in großen Zügen durch das Stromsystem in den Polarlichtzonen (polare Störungen) und durch das in der Aequatorialebene (äquatoriale Störung) charakterisiert.

Neben diesen großen Systemen treten auch kleinere Wirbel auf (analog den Teildepressionen) und wandern mit beträchtlicher Geschwindigkeit.

4. **Zusammenfassung.** Als Ursache des Feldes f+E+T+A ergab sich also: Ein außerhalb der Erde liegendes Stromsystem erzeugt durch Induktion in den magnetisierbaren Massen der Erde, denen eine hohe Permeabilität für kleine Kräfte zukommt, den Hauptteil des permanenten Magnetfeldes f. Einen geringen Anteil zu f liefert die direkte magnetische Wirkung des äußeren Stromsystems. Die zeitliche Aenderung des Feldes f oder das Feld der säkularen Variation E ist bedingt durch die Rotation der Partialfelder des Feldes f um die Erdachse. Durch Ionisierung durch die ultravioletten Strahlen der Sonne wird die obere Atmosphäre stark leitend; durch Schwankungen des Luftdruckes und die Gezeiten des Mondes und der Sonne entstehen Bewegungen der Atmosphäre. Z induziert in diesen bewegten Luftmassen elektrische Ströme, die Ursache des Feldes T. Diese Ströme induzieren im Erdinnern elektrische Ströme, deren magnetische Wirkungen etwa $^1/_4$ des Feldes T darstellen.

Die elektrischen Teilchen, die durch Sonnenfackeln ausgeschleudert werden, werden durch die Ablenkung im magnetischen Erdfeld in die Polarlichtzonen und einen Gürtel um den Aequator eingesogen, steigern dort durch die Ionisation die Leitfähigkeit. Z induziert wieder elektrische Ströme in bewegter Luft, diese und die direkte Wirkung der elektrischen Strombahn der Teilchen sind die Ursachen des Störungsfeldes A.

Literatur. *Besonders wichtig sind die Arbeiten von* ***Gauss*** *(B.V.),* ***Lammont, Neumayer, v. Bezold, A. Schuster, Ad. Schmidt, L. A. Bauer, Fritsche, van Bemmelen, Birkeland.*** — *An Lehrbüchern sind vorhanden:* ***Lammont,*** *Handbuch des Erdmagnetismus. Berlin 1849.* — ***B. Mascart,*** *Traité de Magnetisme terreste. Paris 1900.* — ***A. Nippold,*** *Erdmagnetismus, Erdstrom und Polarlicht. Leipzig 1903. Hier finden sich eingehende Literaturangaben.* — *Ferner die entsprechenden Abschnitte in* ***Winkelmanns,*** *Handbuch der Physik.* — ***Arrhenius,*** *Kosmische Physik.* — ***Günther,*** *Handbuch der Geophysik.* — *Die neueren Arbeiten finden sich meist in der Fachzeitschrift Terrestrial Magnetisme and Atmospheric Electricity (alle 3 Monate 1 Heft). Washington.*

G. Angenheister.

Magnetfeldwirkungen.

In diesem Artikel sollen nacheinander die Kräfte des Magnetfeldes auf Stromträger, die Induktionsströme, und sodann die energetischen Beziehungen zwischen den beiden Erscheinungsgruppen behandelt werden. Den Formeln liegt das „absolute elektromagnetische cm-gr-sec Maßsystem“ zugrunde. Die mechanischen Einheiten dieses Systems, wie 1 Dyn für Kraft, 1 Erg für Energie, werden als bekannt vorausgesetzt. Die benutzten elektrischen und magnetischen Einheiten zu erläutern, wird der Artikel selbst Gelegenheit geben. Einige Resultate werden außer in „c.g.s-Einheiten“ auch noch in den Einheiten des „technischen Maßsystems“ angegeben werden.

1. **Kräfte des Magnetfeldes auf Stromträger.** Die Erscheinung, deren Gesetze wir darzustellen haben, ist diese: stromdurchflossene Leiter erfahren Bewegungsantriebe in der Nachbarschaft von Magneten und von elektrischen Strömen; also allgemein, wenn sie sich in einem magnetischen Felde befinden.

1a) Induktionsfluß durch eine

Kurve. Ein magnetisches Feld können und wollen wir an jeder Stelle des Raumes definieren durch die Größe und Richtung der „magnetischen Induktion" (vgl. den Artikel „Magnetfeld"). Zur

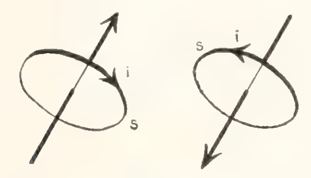


Fig. 1.

Darstellung dieser Richtungsgröße dienen uns die „Induktions"- oder „Kraftlinien".[1]) Dann lautet die Frage: wie hängen die genannten Bewegungsantriebe ab von der magnetischen Induktion oder von dem Verlauf und der Verteilung der Induktionslinien? Ein einfaches Gesetz werden wir nur erwarten dürfen, wenn wir nicht nach der Wirkung auf eine beliebig im Raum verteilte Strömung fragen, sondern ein möglichst einfaches Stromgebilde zur Betrachtung wählen. Das kann auf zweierlei Art geschehen. Zunächst: wir denken uns als Stromträger einen sehr dünnen, in sich zurücklaufenden Leiter, so daß die Strömung ausreichend definiert ist durch eine geschlossene Kurve (s), welche wir in ihm legen können, und durch den gesamten Strom (i), welcher in bestimmtem „positivem" Sinn jeden Querschnitt durchsetzt. (Ein dünner Draht, der in eine beliebige Leitung so eingefügt ist, daß seine Enden sich nahezu berühren, genügt im allgemeinen dieser Forderung.) Wird dieser „lineare" Leiter in ein bekanntes magnetisches Feld gebracht, so läßt sich bei jeder Lage und Form des Leiters die Zahl (Q) der Kraftlinien (oder der „Induktionsfluß") angeben, welcher den Stromleiter in positiver Richtung — nach der Rechtsschraubenregel (vgl. den Artikel „Magnetfeld" und Fig. 1) — durchsetzt. Diese Zahl bestimmt man, indem man in der Kurve s eine Fläche S ausspannt, die von s umrandet wird. Diejenigen Kraftlinien, die durch S in positiver Richtung hindurchtreten, geben positive Beiträge zu Q; die in negativer Richtung hindurchtreten, geben negative Beiträge; die algebraische Summe aller Beiträge ist Q. Diese Methode würde bei beliebig im Raum verteilten Linien verschiedene Resultate ergeben, je nach der Wahl, die man für S trifft; dann kann man von einer bestimmten Zahl, die s durchsetzt, überhaupt nicht sprechen (s. Fig. 2, in der der Schnitt zweier solcher Flächen durch S_1 und S_2, und der Schnitt durch die Kurve s durch die zwei so bezeichneten Punkte dargestellt ist). Unsere Linien aber, die Induktionslinien, sind dadurch ausgezeichnet (vgl. den Artikel „Magnetfeld"), daß sie nirgends Endpunkte haben. Dann sind es notwendig dieselben Linien, welche durch S_1 und S_2 in der Pfeilrichtung hindurchtreten, wie auch S_1 und S_2 gewählt sein mögen, — vorausgesetzt allein, daß beide die gleiche Umrandung s haben. Dann also ist es eine bestimmte Zahl, die s durchsetzt. Und nun läßt sich der Sinn der Bewegungsantriebe, die auf unsern Leiter wirken, sehr einfach aussprechen: sie suchen diese Zahl zu vergrößern.

1b) Gleichgewicht eines linearen Leiters. Das genügt bereits, um zu erkennen, wann der Leiter sich in stabilem Gleichgewicht befindet: das tritt dann ein, wenn der Leiter auf keinerlei Weise, durch keine für ihn mögliche Lagen- oder Formänderung, einen Gewinn an umspannten Kraftlinien erzielen kann. Sei der Leiter etwa zu einer unveränderlichen ebenen Kurve gebogen, im übrigen aber frei beweglich, und befinde er sich in einem gleichförmigen magnetischen Feld (s. Fig. 3), wie wir es in dem

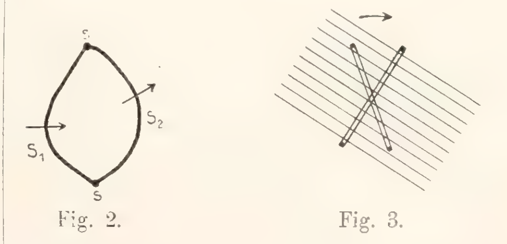


Fig. 2. Fig. 3.

magnetischen Feld der Erde stets zur Verfügung haben. Dann würde sich Q nicht ändern, wenn der Leiter parallel mit sich selbst verschoben wird; also wirkt auch keine Kraft auf ihn, welche eine solche Verschiebung hervorzubringen sucht. Aber Q ändert sich, wenn der Leiter gedreht wird; Q hat sein Maximum Q_0 erreicht, wenn die Ebene des Leiters senkrecht zu den Kraftlinien steht, und zwar so, daß diese die Stromkurve in positiver Richtung durchsetzen. Dies also ist die Lage stabilen Gleichgewichts. Denken wir uns die Ebene in der gleichen Lage, aber um 180 Grad gedreht, so tritt jetzt dem absoluten Betrage nach die gleiche Zahl von Kraftlinien durch s hindurch, aber dies geschieht in negativer Richtung; es ist

[1]) Die Induktion B ist überall, außer in permanenten Magneten, identisch mit der „Polarisation" $\mathfrak{M}$ des Artikels „Magnetfeld", deren Repräsentanten gewöhnlich als „Kraftlinien" bezeichnet werden. Wo es sich nicht um Magnete handelt, wollen wir daher das bequemere Wort „Kraftlinien" zulassen.

also jetzt $Q = -Q_0$; d. h. Q hat bei dieser Lage seinen Minimalwert; diese Lage sucht also der Leiter nicht auf. (Er ist in ihr im labilen Gleichgewicht.)

Denken wir uns weiter den Leiter in der Weise der Figur 4 gebogen, in welcher die



Fig. 4.

Flächenstücke S_1 und S_2 gleich groß sein sollen. Dann treten in einem gleichförmigen Feld bei jeder Lage des Leiters durch S_1 ebensoviel Kraftlinien in einem Sinn, wie durch S_2 in entgegengesetztem Sinn; d. h. in jeder Lage hat Q den gleichen Wert, nämlich 0. Also erfährt der Leiter keinerlei Bewegungsantriebe; er befindet sich in einem gleichförmigen Feld im indifferenten Gleichgewicht.

1 c) Arbeit bei Bewegung eines linearen Leiters. Wir gebrauchten oben den Ausdruck: „die Bewegungsantriebe suchen die Kraftlinienzahl zu vergrößern". Das bedeutet, von Anthropomorphismen befreit: es wird Arbeit gewonnen — die etwa zum Heben von Gewichten verwandt werden könnte — sobald diese Zahl sich vergrößert. Das bisherige bildet also eine Anwendung des mechanischen Satzes, nach welchem ein System dann in Ruhe bleibt, wenn bei keiner von allen möglichen Veränderungen der betrachteten Lage eine Arbeit gewonnen werden kann. — Diesem Prinzip des Gleichgewichts entspricht ein allgemeineres Prinzip, nach welchem sich alle Aussagen über die Bewegungen des Systems ableiten lassen, sobald man für alle möglichen kleinen Veränderungen seiner Lage die geleistete Arbeit angeben kann. Also ist unser System mechanisch vollständig definiert, sobald wir sagen können, welche Arbeit denn geleistet wird, wenn infolge einer Lagenänderung der Induktionsfluß durch die Stromkurve sich vergrößert.

Die Antwort, welche die Erfahrung auf diese Frage gibt, ist so einfach wie nur möglich: die Arbeit (A) ist erstens proportional mit der stattgehabten Vergrößerung (δQ) des Induktionsflusses, sie ist zweitens proportional mit der Stromstärke (i), und sie hängt von keinerlei anderen physikalischen Bedingungen ab. Wir können also schreiben $A = ki.\delta Q$, wo dann k einen konstanten Faktor bedeutet, welcher lediglich durch die Maßeinheiten bestimmt ist, die wir für A, i und Q gewählt haben.

Das absolute elektromagnetische Maßsystem setzt $k = 1$; es ist dies eine der Definitionen, welche seine Einheiten mit einander verknüpfen. Es mißt ferner in Luft die magnetische „Feldstärke" H und die Induktion B durch die gleiche Zahl. Wir haben also

$$A = i.\delta Q \qquad 1)$$

und dazu in allen Körpern, die von remanentem Magnetismus frei sind,

$$B = \mu H \qquad 2)$$

wo μ die, auf Luft als Einheit bezogene, „Permeabilität" der Substanz bezeichnet.

Wenden wir Gleichung (1) auf den Fall der Figur 3 an. Wenn wir die von s umspannte Fläche mit S, und den Winkel zwischen ihrer positiven Normalen N und den Kraftlinien mit ϑ bezeichnen (s. Fig. 5), so ist $S.\cos\vartheta$ die Projektion der umspannten Fläche auf die zu B senkrechte Ebene, und folglich, da B den Induktionsfluß durch die zu den Kraftlinien normale Flächeneinheit bedeutet,

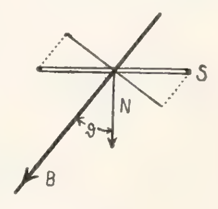


Fig. 5.

$$Q = BS.\cos\vartheta \qquad 3)$$

Bei allen Bewegungen bleibt nach unserer Annahme sowohl S wie B unverändert, bei einer Drehung um die zur Zeichnungsebene senkrechte Achse aber ändert sich $\cos\vartheta$, und zwar bei einer Drehung $\delta\vartheta$ um $-\sin\vartheta.\delta\vartheta$ (vgl. den Artikel „Infinitesimalrechnung"). Also ist die bei dieser Drehung geleistete Arbeit $A = -iBS.\sin\vartheta.\delta\vartheta$. Der Quotient aus Arbeit bei Drehung und Drehungswinkel aber ist das, was man als Drehungsmoment bezeichnet. Der Betrag des Drehungsmoments ist also $iBS.\sin\vartheta$; das Minuszeichen bedeutet, daß es in der Richtung der abnehmenden Winkel ϑ wirkt. — Man denke sich den Stromkreis mittels zweier Drähte, die gleichzeitig zur Stromzuführung dienen, in vertikaler Ebene aufgehängt; dann hat man eine Anordnung, an der man Drehmomente um die Vertikale sehr genau in absolutem Maß messen kann (sogenannte Bifilarsuspension). Eine Induktion B ist auch ohne unser Zutun stets durch die Horizontalkomponente H des Erdfeldes gegeben. Wirkt dieses allein, so bestimmt man also in absolutem Maß (in Erg/cm²) das Produkt i.H, und in relativem Maß (bei unverändertem Erdfeld) die Stromstärke i (Wilhelm Webers Bifilargalvanometer). Ein empfindliches und zugleich von zufälligen äußeren Einwirkungen in hohem Maß freies Instrument erhält man, indem man das starke Feld zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten benutzt (Drehspulengalvanometer nach Deprez-d'Arson-

val). Bei diesen Instrumenten — und bei den meisten der Anordnungen, die wir noch zu besprechen haben werden — handelt es sich in Wahrheit nicht um einen ebenen Stromkreis, sondern um eine eng gewundene Spule. Sei die Zahl ihrer Windungen N. Wenn man sich dann die Spule durch N gleiche ebene Umläufe ersetzt denkt, so sieht man sogleich, daß die Arbeit für die Spule das N-fache derjenigen ist, die für eine einfache Windung gefunden würde. Das gilt, weil und solange durch alle Windungen der gleiche Induktionsfluß hindurchtritt. Allgemeiner: bei der Berechnung von Q ist jede Kraftlinie, die durch N Windungen in positiver Richtung hindurchtritt, N mal zu zählen.

Eine andere Anordnung: ein im übrigen willkürlich geformter Stromkreis laufe in zwei parallele Schienen im Abstand d aus, die durch ein verschiebbares Querstück verbunden sind (Fig. 6). Das Ganze befinde sich

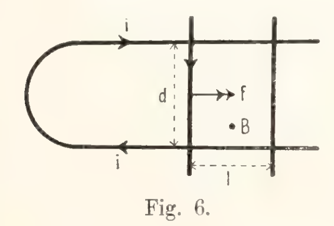


Fig. 6.

in einem Magnetfeld, das, im übrigen beliebig, in der Nähe der Gleitschiene normal zur Zeichnungsebene von vorn nach hinten verlaufen und die Stärke B haben möge. Der Strom habe die Richtung des Pfeils bei i, so daß also die Kraftlinien in positiver Richtung seine Fläche durchsetzen. Denken wir uns nun die Gleitschiene um die Strecke l nach außen verschoben, so wächst die vom Strom umkreiste Fläche um dl und die Induktion durch die Fläche um Bdl. Die gewonnene Arbeit ist also A=iBdl; d. h. mit anderen Worten: auf die Gleitschiene wirkt in der Richtung der vorgenommenen Verschiebung eine Kraft iBd, oder auf die Längeneinheit berechnet iB. Denken wir uns aber die Schiene in ihrer eigenen Richtung verschoben, so ändert sich die umkreiste Fläche nicht; und denken wir die Verschiebung wie vorher, das Feld aber in der Richtung der Verschiebung verlaufend, so wird zwar die Fläche verändert, nicht aber die Induktion durch die Fläche. In keinem dieser beiden Fälle wird Arbeit geleistet; d. h. aber: die Kraft hat keine Komponente nach der Richtung des Leiterstücks und keine nach der Richtung des Feldes; sie steht also senkrecht auf beiden; sie sucht das Leiterstück quer durch die Kraftlinien hindurchzutreiben.

1d) Kraft auf ein Leiterelement. Allgemein: der Zuwachs der Induktion und somit die Arbeit wird jedesmal gemessen durch die Zahl der vom Leiter geschnittenen Kraftlinien, — und die Arbeit, dividiert durch die Verschiebung, ergibt die Kraftkomponente nach der Richtung der Verschiebung. Die vollständige Durchführung dieser rein geometrischen Betrachtung lehrt: die Größe der Kraft auf die Längeneinheit (f) ist im allgemeinsten Fall gleich der Fläche desjenigen Parallelogramms, dessen Seiten nach Größe und Richtung durch i und B gebildet werden, oder

$$f = iB . \sin (i,B) \qquad 4)$$

(Im obigen Beispiel war der Winkel ein rechter, der Sinus also gleich eins.) Um die Richtung von f eindeutig festzulegen, betrachten wir nochmals Figur 6. Denken wir uns die Richtung von i umgekehrt, so treten nun die Kraftlinien, die von vorn nach hinten verlaufen, in negativer Richtung durch die Stromfläche, Q ist also negativ, und es nimmt also ab, wenn sein absoluter Betrag durch die Vergrößerung der Fläche vermehrt wird; es nimmt zu, wenn die Schiene nach innen gleitet; d. h. die Kraft hat jetzt die entgegengesetzte Richtung. Das gleiche gilt, wenn die Richtung von i beibehalten, die des Feldes B aber umgekehrt wird. Also: die Richtung von f ist stets senkrecht zu i wie zu B, ihr Pfeil aber hängt ab von dem Sinn der Drehung, welche die Richtung von i auf kürzestem Wege in die Richtung von B überführt; denken wir diese Drehung mit einer Rechtsschraube ausgeführt, so rückt die Achse der Schraube in der Richtung von f vor (Fig. 7).

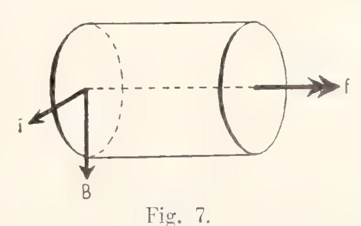


Fig. 7.

Werden Strom und Feld in „absoluten c.g.s.-Einheiten" gemessen, so ergibt sich A in Erg, f in Dyn (= rund Milligrammgewicht). Wird gemäß dem „technischen Maßsystem" i in Ampere, H in Gauß gemessen, so erhält man A in 1/10^8 Watt-Sekunden, f in 1/10 Dyn. — Zur Orientierung über die Zahlwerte sei bemerkt: Die horizontale Komponente des Erdfeldes ist in unseren Gegenden ungefähr H = 0,2 Gauß; der größte Wert, den man für die Induktion erreicht hat — in Eisen mit

großem μ und in sehr kleinen Raumbezirken — ist etwa B=50 000.

Eine der Figur 6 sehr ähnliche Anordnung ist im sogenannten Saitengalvanometer (Einthoven) benutzt: Der feine Draht d ist, an seinen Enden befestigt, quer durch ein starkes Magnetfeld gespannt; er biegt sich, sobald ein Strom ihn durchfließt, in der einen oder anderen Richtung aus. Das Instrument ist höchst empfindlich und nimmt seine Einstellung außerordentlich schnell an.

Im vorstehenden ist die zweite einfache Darstellung der Bewegungsantriebe gewonnen. Wir haben den Ausdruck (4) für die Kraft auf ein Leiterelement aus dem Ausdruck (1) für die Arbeit bei der Verschiebung eines linearen Leiters abgeleitet. Wir hätten ebensowohl umgekehrt verfahren können. Beide Ausdrücke sind vollkommen äquivalent. Haben wir also ein beliebiges Stromsystem in beliebig geformten Leitern vor uns, so können wir dieses entweder in ein System von linearen Stromringen auflösen (das ist stets möglich, wenn es sich nicht um ungeheuer schnell veränderliche Strömung handelt) und (1) anwenden, — oder die einzelnen Leiterelemente betrachten und (4) anwenden. Das Ergebnis muß stets das gleiche sein; bei der Wahl dürfen wir uns durch Rücksichten der Bequemlichkeit leiten lassen.

1e) Dauernde Bewegung. Synchronmotor. Fragen wir uns nun, wie wir durch einen elektrischen Strom dauernd und in unbegrenztem Betrage Arbeit gewinnen können. Eine unbegrenzte Bewegung der Gleitschiene (Fig. 6) im gleichen Sinn kann nicht in Frage kommen. Die Ausführbarkeit verlangt dauernde Bewegung auf begrenztem Raum, also notwendig einen periodisch sich wiederholenden Vorgang. Der ist durch die bisher besprochenen Anordnungen nicht zu erhalten: bei einer bestimmten Lage der Gleitschiene in Figur 6 (der äußersten möglichen entweder rechts oder links), bei einer bestimmten Stellung des drehbaren Kreises in Figur 3, ist die Zahl der umspannten Kraftlinien notwendig ein Maximum, — und dann ist keine Arbeit mehr zu gewinnen. Aber nehmen wir an, daß nun die Richtung des Stromes umgekehrt wird, dann haben wir in dieser selben Lage jetzt ein Minimum umspannter Kraftlinien, — die ganze Zurückbewegung der Gleitschiene, die ganze Drehung des Kreises um 180° liefert wieder Arbeit. Wir erhalten also mittels Wechselstrom einen Motor, aber dieser kann nur „synchron" mit dem Rhythmus des Stromwechsels laufen.

1f) Gleichstrommotor. Es ist aber möglich, auch mittels konstanten, stets gleichgerichteten Stromes dauernde Bewegungen zu erhalten: Eine Stromquelle werde (Fig. 8) einerseits mit dem festen Punkt A eines kreisförmigen Leiters, andererseits mit der Achse E verbunden, von der aus ein drehbarer radialer Leiter zu dem veränderlichen Punkt B des Kreises führt. Längs BEFA fließt dann ein Strom i, der sich zwischen A und B in i_1 und i_2 gabelt. Das

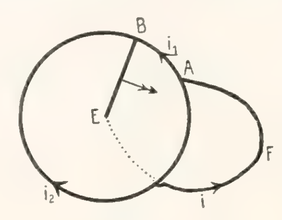


Fig. 8.

ganze befinde sich in einem gleichförmigen Felde B, das senkrecht zur Kreisebene von vorn nach hinten verlaufen möge. An welcher Stelle sich nun auch der radiale Leiter befinden mag, stets wirkt auf jede Längeneinheit die Kraft i.B, und stets im Sinn des Doppelpfeils der Figur. Der Leiter wird also dauernd im gleichen Sinn herumgetrieben, — und mehr als das: das Drehmoment hat dauernd den gleichen Wert. Die Bedeutung dieses Umstandes wird im Abschnitt 2 hervortreten. Wir haben hier den Ausdruck (4) für die Kraft benutzt. Will man auf die Arbeit [Gl. (1)] zurückgehen, so muß man die geschlossenen Stromkreise von i_1 und i_2 betrachten (die sich längs BEFA überlagern), und bedenken, daß die Kraftlinien durch die Bahn von i_2 in positiver, durch die Bahn von i_1 aber in negativer Richtung hindurchtreten. — Unsere Anordnung bildet das Modell eines idealen „Gleichstrommotors".

1g) Barlowsches Rad. Wir wollen das Modell noch etwas umformen: nicht ein einzelner Radius, sondern die ganze Fläche des Kreises soll jetzt leitend sein; einer Kreisscheibe also wird der Strom in ihrer Achse (E) und in einem Punkte (A) der Peripherie zugeführt. Jetzt haben wir unendlich viele Bahnen zwischen A und E, und somit unendlich viele geschlossene „lineare Ströme", die sich in der äußeren Leitung alle überlagern. Dadurch wird das Bild der umspannten Induktion und ihrer Aenderung verschwommen und unbrauchbar. Das Bild der bei der Bewegung geschnittenen Induktionslinien aber bleibt einfach; deren Zahl ist die gleiche für alle die unendlich vielen Stromleiter, die von A nach E führen, und es kommt daher für die Berechnung der Arbeit gar nicht darauf an, wie sich der Gesamtstrom i zwischen ihnen verteilt. Das Drehmoment ist folglich das gleiche, wie im vorigen Fall.

Eine weitere Umformung: nicht die Kreisscheibe soll jetzt beweglich sein, sondern der Rest der Leitung, dem wir etwa die Form des Bügels in Figur 9 geben können. Da das ganze System, als starrer Körper gedacht, kein Drehmoment um die Induktionslinien als Achse erfahren kann, so folgt sofort, daß der Bügel das gleiche, nur entgegengesetzt gerichtete Drehmoment erfährt, wie zuvor die Scheibe. Beim ersten Anblick der Figur ist man versucht, zu schließen, daß keine Bewegung eintreten könne, weil ja der Bügel in jeder neuen Lage wieder genau die gleiche Orientierung gegen das übrige System besitzt. Dies trifft zu; es bedeutet aber nicht: in jeder Lage Gleichgewicht, sondern: in jeder Lage das gleiche Drehmoment.

1h) Unipolarmotor. Bisher dachten wir uns das Feld herrührend von irgendwelchen außerhalb des Systems befindlichen Magneten oder Strömen. Jetzt möge es von einem zylindrischen Magneten herrühren, der selbst vom Strom durchflossen wird (Fig. 10), und dessen Achse die Drehachse, sei es

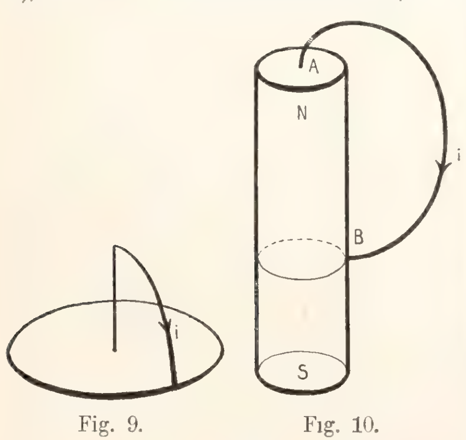


Fig. 9. Fig. 10.

für den Magneten, sei es für den Drahtbügel bildet. Wir erhalten, wie vorher, ein konstantes Drehmoment und somit dauernde Rotation, für den Magneten im einen, für den Bügel im anderen Sinn. Die Größe des Drehmoments hängt nur ab von dem Betrage Q der Induktion, welche den von dem Bügelende B umkreisten Querschnitt des Magneten durchsetzt. (Das Drehmoment ist, wie man leicht sieht, $1/(2\pi) \cdot Qi$.) Ist, wie es der Fall zu sein pflegt, die Magnetisierung symmetrisch, so ist dieser Betrag am größten für den mittleren Querschnitt. Verlegt man von da an den Punkt B näher und näher an S, so nimmt Q fortdauernd ab, und denkt man sich etwa den Magneten durch einen Kupferzylinder verlängert, und die Kontaktstelle B nun auf diesen übergeführt, so sinkt Q sehr schnell zu unmerklichen Werten. Der Extremfall liegt vor, wenn der Stab sehr dünn und gleichförmig magnetisiert ist, so daß er also durch zwei punktförmige Pole an den beiden Endflächen repräsentiert wird: dann erhält man ein Drehmoment, und zwar stets das gleiche, so lange B zwischen N und S liegt, — aber keines, wenn der Bügel AB die beiden Pole umspannt, — und auch keines, wenn er ganz zwischen N und S liegt.

1i) Stromträger im Feld von Strömen. In jedem Fall, wo uns das magnetische Feld eines Stromes bekannt ist, können wir ohne weiteres angeben, welche Kräfte andere Stromträger in seiner Nachbarschaft erfahren. Es bleibt nur noch die formale Aufgabe, diese Kräfte direkt durch die Stromstärken und die Lage der Stromleiter auszudrücken. Es fließe z. B. der Strom i_1 auf einer langen Strecke in gerader Bahn. Dann sind (vgl. den Artikel „Magnetfeld") in der Nachbarschaft die Kraftlinien Kreise um diese Gerade als Achse, die Richtung der Induktion B_1 ergibt sich nach der Rechtsschraubenregel, und ihr Wert ist mit i_1 direkt und mit dem Abstand von der Achse umgekehrt proportional. Befindet sich also dort ein zweiter paralleler Leiter mit gleichgerichtetem Strom i_2 (s. Fig. 11),

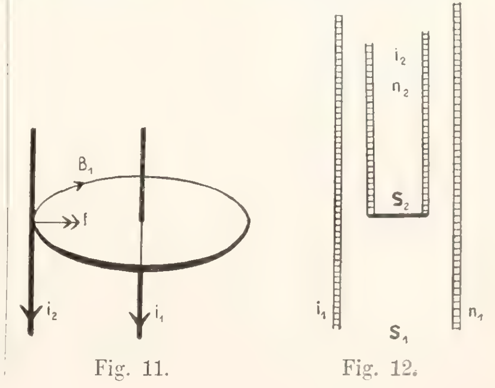


Fig. 11. Fig. 12.

so wird dieser nach der bei Gl. (4) und in Figur 7 gegebenen Regel angezogen. Die Größe der Kraft f ist den beiden Stromstärken direkt, dem Abstand der beiden Leiter umgekehrt proportional. Fließt aber i_1 in der entgegengesetzten Richtung, so kehrt sich die Richtung von B_1 und damit auch diejenige von f um: die Stromträger stoßen sich ab.

1k) Wechselseitiger Induktionskoeffizient. Ein zweites Beispiel (s. Fig. 12): der Strom i_1 fließe in einer langen Spirale mit n_1 Windungen auf der Längeneinheit. Die Spirale bilde eine rechts gewundene Schraube und stehe aufrecht. Fließt dann

der Strom nach oben, so ist auch sein magnetisches Feld nach oben gerichtet. In die Spirale rage das eine Ende einer zweiten ebenfalls sehr langen und rechts gewundenen Spirale hinein, welche n_2 Windungen auf der Längeneinheit hat und den Strom i_2 führe; ihr Querschnitt sei S_2. Fließt i_2 ebenfalls nach oben, so durchsetzen die Kraftlinien von i_1 seine Fläche in positiver Richtung, und die Zahl Q_1 der umspannten Kraftlinien nimmt folglich zu, wenn die zweite Spule weiter in die erste hineingleitet. Sie wird also tatsächlich eingesaugt. Bei entgegengesetzter Richtung des einen der beiden Ströme wird sie hinausgedrängt. Auch die Größe der Kraft läßt sich leicht angeben: Das Feld des Stromes i_1 ist im Innern seiner Spirale $a.n_1i_1$ (vgl. den Artikel „Magnetfeld"), wo a eine Konstante bedeutet, die im absoluten elektromagnetischen Maßsystem 4π ist, also

$$H_1 = 4\pi n_1 i_1 \qquad 5)$$

(Dies ist die zweite der Festsetzungen, welche dieses Maßsystem definieren.) Befindet sich also, was wir annehmen wollen, nur Luft (kein Eisen) im Innern, so gehen durch eine Windung der inneren Spirale $4\pi n_1 i_1 . S_2$ Kraftlinien hindurch. Dringt diese nun um eine Strecke l weiter in die äußere Spirale ein, so treten damit $n_2 l$ neue Windungen ein, die $\delta Q_1 = 4\pi n_1 i_1 S_2 . n_2 l$ als Vermehrung der Zahl umspannter Kraftlinien ergeben. Dies mit i_2 multipliziert, liefert nach Gleichung (1) die Arbeit A, und A/l ist die Kraft

$$f = 4\pi n_1 i_1 . n_2 i_2 S_2 \qquad 6)$$

Nun ist es klar, daß die Arbeit nur von der relativen Verschiebung der beiden Stromträger abhängen kann, sich also ebenso ergeben muß, wenn wir die äußere Spirale über die innere geschoben denken. (Mit anderen Worten: die beiden Körper wirken mit entgegengesetzt gleichen Kräften aufeinander.) Dann aber drückt sich A aus als: $i_1 . \delta Q_2$, wo Q_2 jetzt die Induktion bezeichnet, die von i_2 geliefert und von der äußeren Spule umspannt wird. Nun ist das Feld von i_2 innerhalb seiner eigenen Spirale $4\pi n_2 . i_2$, außerhalb aber 0, es werden also von einer Windung der äußeren Spirale $4\pi n_2 i_2 . S_2$ (nicht etwa $4\pi n_2 i_2 . S_1$) Kraftlinien umspannt, und wenn nun eine Verschiebung l der äußeren Spirale stattfindet und somit $n_1 l$ neue Windungen diesen Induktionsfluß aufnehmen, so ergibt dies eine Vermehrung $\delta Q_2 = 4\pi n_2 i_2 S_2 . n_1 l$. Dies aber mit i_1 multipliziert, liefert tatsächlich den früher gefundenen Wert für A.

Hieran knüpft sich eine Bemerkung allgemeiner Natur. Zunächst: das Feld eines Stromes i_1 ist — solange man die Permeabilität der im Feld befindlichen Körper als konstant betrachten darf, was wir tun wollen — mit i_1 proportional (vgl. die Artikel „Magnetfeld" und „Magnetische Influenz"); das gleiche gilt also auch von der Induktion Q_1, welche er durch die Kurve eines beliebigen zweiten Leiters hindurchsendet. — Schreibt man also $Q_1 = p_{12} . i_1$, so hängt p_{12} nicht mehr von i_1 ab, sondern nur noch von der Lage der beiden Kurven und etwaiger in der Nähe befindlicher magnetisierbarer Körper. Weiter aber: bezeichnen wir mit Q_2 die Induktion, welche ein in dem zweiten Leiter fließender Strom i_2 durch die Kurve des ersten Leiters sendet, so ist $Q_2 = p_{12} . i_2$, wo p_{12} dieselbe Größe wie oben bedeutet. Denn es muß stets $i_2 . Q_1 = i_1 . Q_2$ sein. Der Faktor p_{12} heißt daher wechselseitiger Induktionskoeffizient der beiden Stromkurven; er bedeutet die Induktion, welche ein Strom Eins in der einen Kurve durch die andere Kurve hindurchsendet. Mit Benutzung der hier erläuterten Zeichen können wir die Arbeit bei relativer Verschiebung der beiden Leiter nach Belieben in einer der folgenden Formen ausdrücken:

$$A = i_1 . \delta Q_2 = i_2 . \delta Q_1 = \frac{1}{2}(i_1 . \delta Q_2 + i_2 . \delta Q_1) = i_1 . i_2 . \delta p_{12} . \qquad 7a)$$

1 l) Elektrodynamometer heißen die Meßinstrumente, welche auf den wechselseitigen Kräften zwischen Stromträgern beruhen. Eine Anordnung, die dem soeben behandelten Schema entspricht, wird wohl auch als Stromwage bezeichnet. Die meist benutzte Form hat eine feststehende flache Stromspule mit vertikaler Windungsfläche, in deren Mitte eine zweite drehbar aufgehängt ist; diese sucht sich dann der ersten parallel zu stellen (Wilhelm Weber). Jedes solche Instrument mißt das Produkt der beiden Stromstärken, — insbesondere also, wenn durch beide Spulen der gleiche Strom fließt, das Quadrat seiner Intensität. Im letzteren Fall ist der Ausschlag des Instruments von der Richtung des Stroms unabhängig. Die Festsetzungen des absoluten Maßsystems, die in (1) und (5) zum Ausdruck kommen, haben zur Folge, daß das Quadrat einer Stromstärke von der Dimension einer Kraft ist; das zeigt sich z. B. in Gleichung (6), in der S_2 eine Fläche bedeutet, n_1 und n_2 aber reziproke Längen, so daß bis auf Zahlfaktoren rechts das Produkt von zwei Stromstärken steht, links aber eine Kraft. Mißt man die Kraft in Dyn, so erhält man die Stromstärke in c.g.s.-Einheiten. Die technische Einheit, das Ampere, ist $^1/_{10}$ der c.g.s.-Einheit.

1 m) Selbstinduktionskoeffizient. Soeben haben wir eine spezielle Formel ektrodynamischer Kräfte berührt, diejenigen, welche ein Strom auf seinen eigenen Träger

ausübt. Der allgemeine Charakter dieser Kräfte ergibt sich wie folgt: der Strom sendet Kraftlinien auch durch seine eigene Kurve hindurch; jede Veränderung der Strombahn, durch welche deren Anzahl steigt, wird durch die Kräfte unterstützt.

Der Faktor, mit dem man die Stromstärke multiplizieren muß, um den Induktionsfluß durch die eigene Kurve zu erhalten, heißt der Selbstinduktionskoeffizient der Strombahn, und man kann also auch sagen: jede Bewegung, durch welche dieser Koeffizient vergrößert wird, wird durch die elektrodynamischen Kräfte unterstützt.

Nehmen wir als Beispiel die Anordnung der Figur 6, in der aber jetzt ein äußeres Magnetfeld nicht vorhanden sein soll. Der Strom selbst sendet seine Kraftlinien in positiver Richtung — in der Figur von vorn nach hinten — durch seine Kurve, der Induktionsfluß wächst also, wenn die Querschiene nach außen gleitet, und sie wird daher tatsächlich, bei jeder Richtung des Stromes, nach außen getrieben.

Weiter denke man sich eine Stromspule und in der Nähe einen Eisenkörper. Wenn dieser in die Spule hineingleitet, so steigt die Induktion im Innern der Spule (vgl. den Artikel „Magnetische Influenz"); also wird das Eisen in die Spule eingesaugt. Das ist eine sehr bekannte Tatsache, aber sie wird häufig anders dargestellt. Man sagt: das Eisen ist durch Influenz ein temporärer Magnet geworden, und auf diesen wirken nun die gleichen Kräfte, die in gleicher Lage ein permanenter Magnet erfahren würde. Das ist vollkommen richtig; aber unsere Auffassung des Vorgangs wird sich uns bei der Betrachtung der Energieverhältnisse als die zweckmäßigere erweisen (s. unter 3).

Wir wollen noch die Arbeit, die bei einer bestimmten Vergrößerung der Selbstinduktion geleistet wird, hinschreiben. Sie ist nicht das Produkt aus Stromstärke und Vermehrung des Induktionsflusses, sondern nur halb so groß. Das lehrt die Betrachtung eines speziellen Falles: die Strombahn enthalte zwei Schleifen s_1 und s_2, (Fig. 13), welche

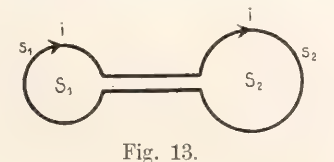


Fig. 13.

jede für sich unverändert bleiben, aber gegeneinander bewegt werden sollen. Dann besteht die gesamte Induktion durch die Strombahn aus zwei Anteilen, die sich nicht ändern: der Induktion, die der Strom in s_1 durch S_1, und die der Strom in s_2 durch S_2 sendet, — und zwei Anteilen, die sich ändern: der Induktion, die der Strom in s_1 durch S_2 und die der Strom in s_2 durch S_1 sendet. Das sind die Größen, die in Gleichung (7a) mit Q_1 bzw. Q_2 bezeichnet sind. Die Summe ihrer Aenderungen stellt die Aenderung des gesamten Induktionsflusses dar. Wenn wir diesen letzteren mit Q_{11} und den Strom mit i_1 bezeichnen, so ist folglich in (7a) zu setzen: $\delta Q_1 + \delta Q_2 = \delta Q_{11}$ und $i_1 = i_2$. Also ist nach der dritten Form der Gleichung:

$$A = \tfrac{1}{2} . i_1 . \delta Q_{11} \qquad 7b)$$

oder, wenn wir den Selbstinduktionskoeffizienten p_1 nennen, und demgemäß $Q_{11} = p_1 . i_1$ setzen:

$$A = \tfrac{1}{2} . i_1^2 . \delta p_1 \qquad 7b)$$

11) Werte der Induktionskoeffizienten. Koppelung. Um einen Ringkörper (s. Fig. 14) sei in N_1 gleichmäßig verteilten Windungen ein Draht mit dem Strom i_1 geschlungen. Das Feld dieses Stromes beschränkt sich (vgl. die Artikel „Magnetfeld" und „Magnetische Influenz") auf den Ringkörper, die Kraftlinien verlaufen hier in Kreisen um die Ringachse, und die magnetomotorische Kraft ist für jeden dieser Kreise $= 4\pi N_1 i_1$. Sei l der Umfang eines passend gewählten mittleren Kreises, S der Querschnitt des Ringes, und μ die Permeabilität der Substanz, aus der der Ring gebildet ist. Dann ist im Mittel

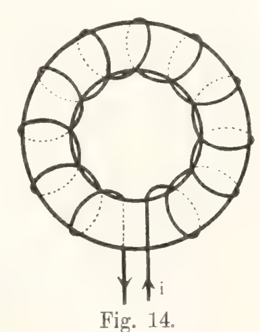


Fig. 14.

$$H_1 = \frac{4\pi N_1 i_1}{l} \qquad 5a)$$

die Feldstärke[1]), also

$$q_1 = \mu H_1 S = 4\pi N_1 i_1 . \frac{\mu S}{l} \qquad 8)$$

der Induktionsfluß durch eine Drahtwindung, und endlich $Q_1 = 4\pi N_1^2 . \mu S / l . i_1$ der gesamte Induktionsfluß, den der Strom i_1 durch alle seine N_1 Windungen sendet. Also ist

$$p_1 = 4\pi N_1^2 . \frac{\mu S}{l} \qquad 9a)$$

der Selbstinduktionskoeffizient des Stromkreises.

[1]) (5a) und (5) sind inhaltsgleich, da N_1/l dasselbe bedeutet, wie n_1: fern von den Enden ist das Feld der geraden Spule das gleiche, wie das Feld der endlosen, zum Kreise geschlossenen.

Nun sei auf denselben Ring noch ein zweiter Draht mit N_2 ebenfalls gleichmäßig verteilten Windungen gewickelt. Der gesamte Induktionsfluß durch diese N_2 Windungen ist dann $4\pi N_1 N_2 . \mu S/l . i_1$, und der wechselseitige Induktionskoeffizient der beiden Strombahnen ist daher

$$p_{12} = 4\pi N_1 N_2 . \frac{\mu S}{l} \qquad 9b)$$

Der Selbstinduktionskoeffizient der zweiten Strombahn aber ist offenbar

$$p_2 = 4\pi N_2^2 . \frac{\mu S}{l} \qquad 9c)$$

Die hier besprochene Anordnung ist in zweifacher Weise ausgezeichnet. Zunächst bezüglich jedes einzelnen der beiden Stromkreise: Jede Kraftlinie, die ein Strom in der ersten Bahn durch eine seiner eigenen Windungen sendet, geht durch alle seine Windungen. In jedem solchen Fall erweist sich der Begriff des „magnetischen Kreises" als nützlich; es läßt sich (vgl. den Artikel „Magnetische Influenz") der Induktionsfluß, der jede Windung durchsetzt, mit Hilfe des „magnetischen Widerstandes" R darstellen:

$$q_1 = 4\pi N_1 i_1 \frac{1}{R} \qquad 10)$$

Aus der jetzigen Betrachtung aber ersieht man, daß dann der Selbstinduktionskoeffizient mit dem Quadrat der Windungszahl proportional ist. — Das gleiche wird offenbar nahezu der Fall sein, wenn nahezu der gleiche Induktionsfluß durch alle Windungen geht. Dies aber erreicht man allgemein, indem man den Innenraum der Windungen mit Eisen ausfüllt; denn der Körper von hoher Permeabilität hält die Kraftlinien zusammen. Behält der Eisenkörper seine Ringform, werden aber die Windungen ungleichmäßig auf ihn verteilt, so wird der magnetische Widerstand und somit auch der Selbstinduktionskoeffizient hierdurch nicht sehr wesentlich verändert. Wird aber der Ring aufgeschnitten, so steigt, selbst bei einem engen Luftschlitz, der Widerstand sehr wesentlich und der Selbstinduktionskoeffizient nimmt also stark ab. (Vgl. den Artikel „Magnetische Influenz".) Bleibt andererseits die Verteilung gleichmäßig, ist aber das Eisen vollständig entfernt, so bleiben alle abgeleiteten Beziehungen bestehen, aber für μ ist an Stelle der hohen Werte, die es für Eisen hat, der Wert eins zu setzen. Um große Selbstinduktionskoeffizienten zu erhalten, braucht man also große Windungszahl (N), möglichst vollständige Füllung mit Eisen (μ), möglichst gedrungene Form (S/l).

Die Koeffizienten p drücken sich gemäß den Gleichungen (9), d. h. gemäß den Festsetzungen des absoluten Maßsystems, als Längen aus, und werden in cm gefunden. Will man sie in „Henry", der Einheit des technischen Maßsystems messen, so muß man die Werte der Gleichungen (9) durch 10^9 dividieren. Zur Orientierung mag dienen: Eine Spule von 100 Windungen, auf einem gedrungenen Ring von etwa 15 cm Außenmaß hat einen Selbstinduktionskoeffizienten von etwa $^1/_{10}$ Henry, wenn sie auf weiches Eisen von der Permeabilität 1000 gewickelt ist, dagegen nur von $^1/_{10000}$ Henry, wenn sich innen Luft befindet. Die „Sekundärspulen" großer Funkeninduktoren ohne Eisenkern haben Selbstinduktionskoeffizienten von der Ordnung 100 Henry.

Eine weitere ausgezeichnete Eigenschaft der oben besprochenen Anordnung ist diese: jede Kraftlinie des ersten Stromes geht auch durch jede Windung der zweiten Strombahn hindurch, und umgekehrt. Dies hat, wie sich in der obigen Ableitung deutlich zeigt, zur Folge, daß das Quadrat des wechselseitigen gleich dem Produkt der Selbstinduktionskoeffizienten wird:

$$p_{12}^2 = p_1 . p_2 \qquad 11)$$

Auch diese Beziehung gilt noch nahezu, wenn die beiden Stromwindungen ungleichförmig auf dem Ring verteilt sind. Man nennt nun zwei Stromkreise „magnetisch gekoppelt", sobald ein Strom in dem einen überhaupt Kraftlinien durch den anderen hindurchsendet, sobald also ihr wechselseitiger Induktionskoeffizient von Null verschieden ist. Den Grad der Koppelung beurteilt man nach dem Wert des Quotienten

$$\frac{p_{12}^2}{p_1 . p_2}$$

Nun läßt sich zeigen, daß dieser Bruch nie größer als eins werden kann; die Gleichung (11), die bei unserer Ringanordnung erfüllt ist, stellt also einen äußersten Fall, den der denkbar „engsten" Koppelung, dar. Eine „enge" Koppelung erhält man zwischen zwei Drahtschleifen, die nahe zur Berührung gebracht sind; und enge Koppelung zugleich mit großen Werten der Induktionskoeffizienten durch zwei Spulen, die auf denselben Eisenkern gewunden sind.

Die oben besprochene Anordnung der geschlossenen Ringspulen ist praktisch von großer Bedeutung, wie sich im Abschnitt 2 zeigen wird; aber Arbeit läßt sich aus ihr offenbar nicht gewinnen. Dazu ist nötig, daß sich der Induktionsfluß durch Bewegung der Leiter ändern läßt. Betrachten wir also noch eine Anordnung, bei der die wechselseitige Induktion veränderlich und zugleich leicht zu berechnen ist. Der Strom i_1 fließe in einer langen geraden Spule von der Länge l_1 dem Querschnitt S_1 und N_1 Windungen, und sei

durch einen zylindrischen Körper von der Permeabilität μ ausgefüllt. Dann ist der Induktionsfluß durch jeden Querschnitt, der weit von den Enden entfernt ist: $q_1 = 4\pi N_1 i_1 . \mu S_1/l_1$ (vgl. (8) und die Anmerkung zu (5a)). Hier nun sei die Spule von einer zweiten flachen Spule mit N_2 Windungen und dem Strom i_2 umschlossen. Dann wird diese von dem Induktionsfluß $Q_1 = N_2 q_1$ durchsetzt. Es ist daher

$$Q_1 = 4\pi i_1 N_1 N_2 \cdot \frac{\mu S_1}{l_1} \qquad 12)$$

Denken wir uns jetzt die flache Spule in große Entfernung von der langen Spule gebracht, so daß sie von keiner Kraftlinie des Stromes i_1 mehr durchsetzt wird. Um diese Bewegung hervorzubringen, muß eine Arbeit $A = i_2 Q_1$ von außen aufgewandt werden. Wenn umgekehrt die Spule aus großer Entfernung in die oben beschriebene Lage übergeht, so leisten die elektrodynamischen Kräfte die gleiche Arbeit.

1o) Induktionsfreie Leitungen. Das Feld eines Stromes, der in einem zylindrischen oder auch hohlzylindrischen Leiter fließt, ist im ganzen Außenraum das gleiche, als wenn der ganze Strom in der Achse konzentriert wäre. Besteht also die Hinleitung aus einem gestreckten Draht und die Rückleitung aus einem den Draht umgebenden koaxialen Hohlzylinder, so ist nirgends im Außenraum ein Feld. Der Strom sendet durch keine äußere Bahn Kraftlinien, und seine Bahn empfängt daher auch von keinem äußeren Strom Kraftlinien. Das gleiche gilt praktisch auch, wenn Hin- und Rückleitung zusammengedrillt sind; und auch dann, wenn sie nicht gradlinig gestreckt sind. — In ähnlicher Weise kann man die Selbstinduktion zwar nicht zum Verschwinden bringen, wohl aber stark herabdrücken. So würden große Widerstände aus Draht, in der gewöhnlichen Weise aufgespult, eine Selbstinduktion besitzen, die sie für viele Zwecke unbrauchbar machen würde. Man vermeidet den Uebelstand, indem man den Draht so wickelt, daß gleich viele Kreise im einen und im anderen Sinn vom Strom durchlaufen werden.

1p) Aequivalenz von elektrischen Strömen und Magneten. Ein kleiner ebener Stromkreis von der Fläche S befinde sich, von Luft umgeben, im Felde H. Dann ist nach Gleichung (1), (2) und (3) die Arbeit, die bei irgendeiner Lageänderung des Stromkreises geleistet wird, gleich der Zunahme, welche das Produkt iSH.cos ϑ durch diese Lagenänderung erfährt, wo ϑ den Winkel zwischen der Normalen der Stromfläche und der Feldrichtung bedeutet. Denken wir uns nun in dem gleichen Felde einen kleinen Magneten vom Momente K, dessen Achse mit der Feldrichtung den Winkel ϑ einschließt, so wird (vgl. den Artikel „Magnetische Induktion") bei dessen Verschiebung eine Arbeit geleistet, die der Aenderung von KH.cos ϑ gleich ist. Magnet und Stromträger erfahren also die gleichen Kräfte, wenn das Moment denselben Wert hat, wie das Produkt aus Stromstärke und Fläche, und wenn die Achse dieselbe Richtung hat, wie die Flächennormale. Das sind die nämlichen Bedingungen, unter denen auch das Feld des Stromes das gleiche ist, wie das des Magneten. Daraus ergibt sich aber ganz allgemein: wenn ein beliebiges Stromsystem einem bestimmten Magnetsystem äquivalent ist bezüglich des erzeugten Feldes, so ist es ihm auch äquivalent bezüglich der Kräfte, die es in einem beliebigen fremden Felde erfährt. — Diese Tatsache kann zuweilen dazu dienen, die Kräfte auf Stromträger in einfacher Weise abzuleiten; so erkennt man in der Kraft f der Gleichung (6) leicht diejenige Kraft, welche das Feld $H_1 = 4\pi n_1 i_1$ der äußeren Spule (s. Gleichung (5)) auf die magnetische Menge $m = n_2 i_2 S_2$ am Ende der inneren Spule (vgl. den Artikel „Magnetfeld") ausübt.

2. Induktionsströme. 2a) Grundgesetz. Es gibt elektrische Ströme, die mit unveränderlicher Stärke in ruhenden Leitern fliessen. Ihr Vorkommen ist gebunden an das Vorhandensein von „Stromquellen" — galvanischen Elementen, Thermoelementen — in den Stromkreisen selbst. Die Gesetze dieser „stationären Ströme" werden als bekannt vorausgesetzt; sie werden im folgenden nicht behandelt. Hier soll vielmehr von elektrischen Strömen die Rede sein, die ohne solche inneren Stromquellen zustande kommen, — den sogenannten Induktionsströmen. Sie sind ihrerseits gebunden an zeitliche oder räumliche Veränderungen. Zwei Beispiele: Erstens: ein Stromkreis, der galvanische Elemente enthält (primärer Kreis), befindet sich in der Nähe eines Leiterkreises, der keine Stromquelle enthält (sekundärer Kreis). Im sekundären Kreis entsteht ein Strom, sobald der primäre Kreis geöffnet oder geschlossen wird. Zweitens: einem Leiterkreis wird ein Magnet genähert; während der Bewegung entsteht ein Strom. Das gemeinsame der beiden Fälle und die allgemeine wesentliche Bedingung für das Auftreten von Induktionsströmen in einem Leiter ist dies: der Leiter befindet sich in einem magnetischen Feld, und dieses Feld ändert sich. Ein einfaches Gesetz finden wir, wie im Abschnitt 1, wenn wir einen geschlossenen linearen Leiter betrachten. In ihm entsteht ein Induktionsstrom jedesmal dann, wenn der Induktionsfluß (Q) durch die Stromkurve (s) sich ändert. Das ist das qualitative Gesetz. Bezüglich des quantitativen bemerken wir: Die Stromstärke (i) hängt noch von dem Widerstand

(w) des Leiters ab. Wir fragen nach dem Produkt beider Größen, der „induzierten elektromotorischen Kraft" $\mathfrak{E} = iw$. Diese ist proportional der Geschwindigkeit, mit welcher der Induktionsfluß durch s sich ändert, oder dem Quotienten $\delta Q/\delta t$, wo δt ein Zeitelement, δQ die in diesem Zeitelement erfolgende Zunahme von Q bedeuten soll. Wollen wir auch die Richtung von $\mathfrak{E}$ festlegen, so müssen wir sagen, daß $\mathfrak{E}$ mit $-\delta Q/\delta t$, d. h. mit der Abnahmegeschwindigkeit von Q proportional ist. Das ist so zu verstehen: wir denken uns die Durchtrittsrichtung, für welche wir den Induktionsfluß Q positiv zählen wollen, fest gewählt; dann ist damit gemäß der Rechtsschraubenregel (Fig. 1) auch die positive Richtung in der Kurve s festgelegt. $\mathfrak{E}$ hat diese Richtung, wenn Q abnimmt, — die entgegengesetzte, wenn Q zunimmt (Fig. 15).

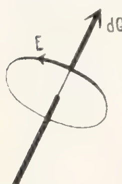


Fig. 15.

Im absoluten elektromagnetischen Maßsystem nimmt das Gesetz die denkbar einfachste Form an: „Die in s induzierte elektromotorische Kraft ist gleich der Abnahmegeschwindigkeit des Induktionsflusses durch s."

$$\mathfrak{E} = -\frac{\delta Q}{\delta t} \qquad 13)$$

(Diesmal ist keine Wahl mehr; nachdem wir durch die Gleichungen (1) und (5) über die Maßeinheiten bereits verfügt haben, ist der Proportionalitätsfaktor erfahrungsmäßig gleich 1. Wir hätten aber (13) an Stelle von (1) zur Definition der Maßeinheiten benutzen können.) Im technischen Maßsystem ist $\mathfrak{E} = -\frac{1}{10^8}\frac{\delta Q}{\delta t}$.

Vorstehende Gleichung bestimmt ausschließlich die induzierte elektromotorische Kraft; enthält der Leiterkreis etwa noch Elemente mit der elektromotorischen Kraft $\mathfrak{E}_0$, so addieren sich beide, so daß also das Ohmsche Gesetz im allgemeinen Fall die Form annimmt:

$$iw = \mathfrak{E}_0 + \mathfrak{E} \qquad 14)$$

Den Inhalt dieses Abschnittes wird vorwiegend die Ausführung der Gleichungen (13) und (14) bilden. Gleichung (14) knüpft die Zahlwerte elektromotorischer Kräfte an die Zahlwerte von Stromstärken und Widerständen; sind diese „technisch" in Ampere bzw. Ohm ausgedrückt, so ergibt sich $\mathfrak{E}_0$ und $\mathfrak{E}$ in „Volt".

2b) Ein ruhender Stromkreis. Entstehen und Verschwinden des Stromes. Wir setzen zunächst voraus, daß alle in Betracht kommenden Körper ruhen, — und wir nehmen vorerst weiter an, daß es sich um einen einzigen Stromkreis handelt. Ist in ihm eine innere elektromotorische Kraft $\mathfrak{E}_0$ vorhanden, und ist der Widerstand w, so ist der stationäre Strom gegeben durch die Gleichung

$$iw = \mathfrak{E}_0 \qquad 15)$$

Nun möge aber ursprünglich die Stromstärke einen anderen Wert haben, weil entweder elektromotorische Kraft oder Widerstand von dem obigen Wert abwichen. Dann muß der Strom sich ändern, bis er den Wert in (15) erreicht; solange er sich ändert, ändert sich aber auch der Induktionsfluß Q, den er durch seine eigene Kurve sendet; solange also gesellt sich zu der gegebenen elektromotorischen Kraft $\mathfrak{E}_0$ die induzierte $\mathfrak{E} = -\delta Q/\delta t$, die in diesem Fall der „Selbstinduktion" entspringt. Wenn i wächst, so wächst auch Q, also ist $\mathfrak{E}$ negativ, d. h. wirkt abschwächend auf den vorhandenen Strom; — wenn i abnimmt, so nimmt auch Q ab, also ist $\mathfrak{E}$ positiv, d. h. wirkt steigernd auf den vorhandenen Strom. Zusammen: die Selbstinduktion wirkt jeder Aenderung der Stromstärke entgegen; sie verzögert das Anwachsen ebenso wie das Abnehmen des Stromes. Die Ausrechnung ergibt folgendes: Q ist (bei Anwesenheit von Eisen freilich nur mit einer gewissen Näherung) proportional mit i, nämlich = pi, wenn p wieder den Selbstinduktionskoeffizienten der Strombahn bezeichnet; aus (13) und (14) folgt also:

$$iw = \mathfrak{E}_0 - p \cdot \frac{\delta i}{\delta t} \qquad 16)$$

Es sei nun 1) bis zum Moment t=0 der Stromkreis offen ($w=\infty$), also i=0. Dann ist die Lösung von (16):

$$iw = \mathfrak{E}_0 \left\{ 1 - e^{-\frac{wt}{p}} \right\} \qquad 17a)$$

(Daß dieser Wert tatsächlich der Gleichung (16) genügt, kann nach den Regeln des Artikels „Infinitesimalrechnung" leicht verifiziert werden; zudem liefert er für t=0: i=0.) Der Strom i steigt hiernach vom Anfangswert 0 auf, und erreicht schließlich seinen Endwert $\mathfrak{E}_0/w$. Das geschieht theoretisch vollständig erst nach unendlich langer Zeit, praktisch vollständig, d. h. bis auf unmeßbar kleine Bruchteile, in der Regel in sehr kurzer Zeit. Der zeitliche Verlauf hängt ausschließlich von dem Quotienten p/w=T ab, der daher als „Zeitkonstante" des Stromkreises bezeichnet wird. Daß p/w tatsächlich eine Zeit ist, folgt am einfachsten aus der Gleichung (16) selbst, die nur dann einen Sinn hat, wenn wi und pi/t Größen gleicher Art, gleicher „Dimension" nach dem Terminus technicus, sind. Man erhält T in Sekunden, wenn p und w entweder beide in absolutem Maß, oder beide in technischem Maß, nämlich p in „Henry" (s. oben) und w in „Ohm" gemessen sind. Wenn man, wie wir es taten,

zunächst 1 Henry definiert hat, so kann (17a) dazu dienen, 1 Ohm zu definieren. Da im absoluten, wie im technischen System p als Länge gemessen wird, so wird $w=p/T$ offenbar als Geschwindigkeit gemessen. Zur Orientierung mag dienen, daß der Widerstand eines Kupferdrahtes von 1 m Länge und 1 mm Durchmesser rund $^2/_{100}$ Ohm ist. In Figur 16, linke Seite, ist dargestellt, wie sich

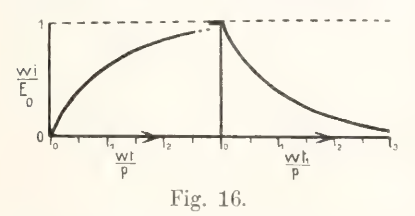


Fig. 16.

$wi/\mathcal{E}_0$ seinem Endwert 1 annähert. Es zeigt sich, daß es ihn bis auf $13\,^0/_0$ erreicht hat, wenn $t=2T$ geworden ist, und bis auf $5\,^0/_0$, wenn $t=3T$ geworden ist; für $t=6T$ bleibt nur noch ein Rest von $0{,}2\,^0/_0$. Betrachten wir diesen Rest etwa als die Grenze dessen, was uns praktisch noch interessiert! Die 100 Windungen der Ringspule unter 1 n mögen einen Widerstand von etwa $^1/_{10}$ Ohm haben; dann ist p/w bei Eisenfüllung etwa 1 Sekunde, bei Luftfüllung etwa $^1/_{1000}$ Sekunde; die Grenze ist also nach 6 Sekunden, bezw. $^6/_{1000}$ Sekunden erreicht.

Es sei der Strom stationär geworden, und es werde nun 2) im Moment $t_1=0$ das Element ausgeschaltet, und durch einen Leiter von gleichem Widerstand ersetzt, so daß von jetzt an $\mathcal{E}_0=0$ ist, während im übrigen der Stromkreis unverändert bleibt. Dann wird der Strom nicht sofort $=0$, vielmehr folgt aus (16):

$$iw=\mathcal{E}_0 . e^{-\frac{wt_1}{p}} \qquad 17b)$$

(Bezüglich der Verifizierung vgl. Anmerkung zu 17a).) Der Verlauf ist in der rechten Hälfte der Figur 16 dargestellt; $wi/\mathcal{E}_0$ nähert sich jetzt in genau der gleichen Weise dem Wert 0 an, wie vorher dem Wert 1.

2c) Nahezu geschlossener Leiter. Spannung. Bisher war von einem vollständigen geschlossenen Stromkreis die Rede. Im folgenden werden wir wiederholt Teile von Stromkreisen betrachten, die in sich konstante Stromquellen (Elemente) nicht enthalten. Es gilt dann bekanntermaßen für stationäre Ströme allgemein das Ohmsche Gesetz in der gleichen Form $iw=\mathcal{E}_0$, wie für einen vollständigen Stromkreis, wenn man hier unter $\mathcal{E}_0$ die Spannung (Potentialdifferenz) zwischen den Enden des betrachteten Leiterstücks, unter w seinen Widerstand versteht. (In dem allgemeineren Fall, daß das Leiterstück selbst Stromquellen enthält, würde $\mathcal{E}_0$ die Summe aus dieser inneren elektromotorischen Kraft und der von außen erzeugten Spannung bedeuten.) Im Fall nicht-stationärer Ströme ist in der Stromgleichung (14) rechts die induzierte elektromotorische Kraft $\mathcal{E}$ $\partial Q/\partial t$ hinzuzufügen. Q, der Induktionsfluß durch die Stromkurve, hat aber einen bestimmten Sinn nur für eine geschlossene Kurve, und ist praktisch hinlänglich definiert für eine nahezu geschlossene Kurve. So kann man von einem bestimmten Induktionskoeffizienten bei einem aufgeschnittenen Kreisleiter sprechen, — aber auch bei einer langen Spule von vielen Windungen, wenngleich die Enden weit voneinander entfernt sind; denn es macht verhältnismäßig wenig aus, wie man die Enden verbunden denkt, wenn nur weite Schleifen vermieden werden.

2d) Wechselstrom. Es möge nun ein solcher nahezu geschlossener Leiterkreis s vorliegen, zwischen dessen Enden eine periodische Spannung

$$\mathcal{E}_0 = A.\sin(nt) \qquad 18a)$$

besteht, wo A und n Konstanten bedeuten sollen. $\mathcal{E}_0$ soll also zwischen den Grenzwerten $-A$ und $+A$ schwanken; die Zahl der Vorzeichenwechsel in der Sekunde soll n/π, oder die Dauer einer vollen Periode soll $T=2\pi/n$ sein. Diese elektromotorische Kraft wird zwar selbst durch Induktion erzeugt sein; wir wollen uns aber vorstellen — wie dies den tatsächlichen Verhältnissen etwa einer städtischen Anlage entspricht — daß s nur eine nahezu geschlossene Schleife in einer weit ausgedehnten Leitung bildet, und daß die Induktion an einer anderen, weit entfernten Stelle der Leitung erfolgt. Um diesen Teil des Vorgangs wollen wir uns einstweilen nicht kümmern, vielmehr $\mathcal{E}_0$ als etwas Gegebenes betrachten. Ist nun $\mathcal{E}_0$ periodisch, wie es (18a) angibt, so wird auch i periodisch, nämlich:

$$\left.\begin{aligned} & w'i = A.\sin(nt-k) \\ & \text{wo } w' = \sqrt{w^2+(np)^2},\ \operatorname{tang} k = \frac{np}{w} \end{aligned}\right\} \qquad 18b)$$

(Daß die Werte in (18) der Gleichung (16) genügen, ist leicht zu verifizieren nach Anleitung des Artikels „Infinitesimalrechnung“.) Um den Inhalt dieser Gleichungen zu erkennen, wollen wir einmal annehmen, der Stromkreis habe keine Selbstinduktion ($p=0$). Dann hätten wir $w'=w$, $k=0$, also $wi=A.\sin(nt)=\mathcal{E}_0$, gerade so, wie dies für einen stationären Strom nach dem Ohmschen Gesetz gelten würde. Die Wirkung der Selbstinduktion ist also eine zweifache: Erstens hat sich scheinbar der Widerstand vermehrt; denn, bezeichnen wir den größten Wert von i, die „Amplitude“ des Stroms, mit i_0, so ist nicht $i_0=A/w$, sondern $i_0=A/w'$. w' wird als „Impedanz“ des Stromkreises bezeichnet; sie drückt sich ge-

mäß (18b) aus durch den „Ohmschen Widerstand“ w und den „induktiven Widerstand“ np. Der letztere, und somit die Impedanz, hängt also nicht nur vom Stromkreis selbst, sondern auch von der Wechselzahl ab. — Zweitens erreichen Strom und Spannung nicht gleichzeitig ihre Maximalwerte; vielmehr ist der Strom gegen die Spannung um den Winkel k „in der Phase verzögert“; s. Figur 17, welche einerseits $\mathcal{E}_0/A = \sin(nt)$,

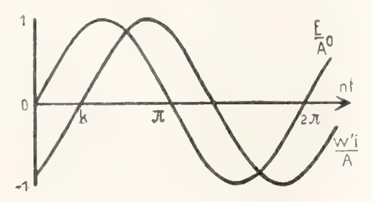


Fig. 17.

andererseits $w'i/A = \sin(nt - k)$ darstellt. Ein Beispiel: wählen wir die übliche Wechselzahl der Starkstromanlagen $n/\pi = 100/\text{sec}$ und die vorhin erwähnte Ringspule; dann ist in runden Zahlen für Luftfüllung $np = 0{,}03$ Ohm, für Eisenfüllung $np = 30$ Ohm, und in beiden Fällen $w = 0{,}1$ Ohm. Im ersten Fall ist die Impedanz 0,1 Ohm; sie ist praktisch durch den Ohmschen Widerstand bestimmt; im zweiten Falle ist sie 30 Ohm; sie ist ganz durch den induktiven Widerstand bestimmt. Im ersten Falle beträgt die Phasenverzögerung etwa 17°, im zweiten Fall hat sie bereits bis auf wenige Bogenminuten den Höchstwert 90° erreicht, der einem verschwindend kleinen w entsprechen würde. Im Fall des Eisenrings verhält sich also alles merklich so, als ob die Spule überhaupt keinen Ohmschen Widerstand besäße: die durch äußere elektromotorische Kräfte gegebene Spannung ($\mathcal{E}_0$) an den Enden wird praktisch vollständig durch die selbstinduzierte elektromotorische Kraft ($p \cdot \partial i/\partial t$) kompensiert; für den Spannungsverlust durch Widerstand (iw) bleibt so gut wie nichts übrig.

Ein Leiter, bei dem der induktive Widerstand sehr groß ist gegen den Ohmschen, und bei dem folglich die Phasendifferenz zwischen Strom und Spannung nahezu 90° beträgt, wird als „Drosselspule“ bezeichnet.

Die gleiche Impedanz und somit die gleiche Stromstärke würde man stets auch bei kleiner Selbstinduktion durch entsprechende Vergrößerung des Ohmschen Widerstandes hervorbringen können, — die gleiche Phasenverzögerung aber nicht. Dies ist von größter Bedeutung in energetischer Beziehung (s. unter 3).

Zur Veranschaulichung des Gesagten kann der folgende Versuch dienen: In einer Stromleitung, die Glühlampen enthält, kann außer diesen nach Wahl die obige Ringspule, mit Eisen gefüllt, eingeschaltet werden. Wird durch die Leitung Gleichstrom gesandt, so macht es gegenüber dem Widerstand der Lampen nichts aus, ob noch der Widerstand 0,1 Ohm der Spule hinzukommt; die Lampen brennen gleich hell, ob die Spule eingeschaltet ist oder nicht. Wird aber Wechselstrom von gleicher Spannung und von 100 Wechseln in der Sekunde benutzt, so erlöschen die Lampen, sobald die Spule eingeschaltet ist; denn diese vermehrt den induktiven Widerstand der Leitung um 30 Ohm.

2e) Stromverzweigung für Wechselstrom. Eine unmittelbar einleuchtende Erweiterung der vorstehenden Ueberlegung ergibt das Gesetz der Stromverzweigung für Wechselstrom. Ein Strom i (Fig. 18) gable

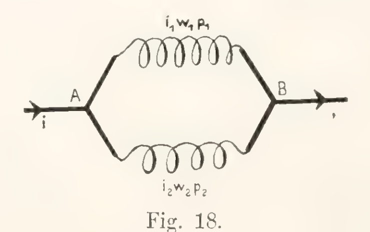


Fig. 18.

sich in die Zweige i_1 und i_2, so daß $i = i_1 + i_2$ ist. Dann ist für stationären Strom das Verhältnis der beiden Stromteile dadurch bestimmt, daß die Spannung zwischen den Punkten A und B sich einerseits als das Produkt $i_1 w_1$, andererseits als das Produkt $i_2 w_2$ ausdrückt; also

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{w_2}{w_1} \qquad 19a)$$

Für Wechselstrom von der Wechselzahl n/π treten an Stelle der Ohmschen Widerstände w_1 und w_2 die Impedanzen und es wird, mit leicht verständlicher Bezeichnung,

$$\frac{i_{1max}}{i_{2max}} = \frac{\sqrt{w_2^2 + (np_2)^2}}{\sqrt{w_1^2 + (np_1)^2}} \qquad 19b)$$

Der Unterschied wird anschaulich durch eine leichte Abänderung des obigen Versuchs: der Zweig 1 enthalte Glühlampen, der Zweig 2 außer Glühlampen noch eine Drosselspule. Bei Gleichstrom brennen die Lampen beider Zweige gleich hell, bei Wechselstrom erlöschen die Lampen des Zweiges 2.

2f) Kondensatorkreis. Unser Stromkreis möge jetzt bei A und B in den Platten eines Kondensators enden (s. Fig. 19). Dann ist die Spannung zwischen A und B durch die Ladung $\pm P$ des Kondensators bestimmt, und zwar ist $\mathcal{E}_0 = P/c$, wenn c die Kapazität des Kondensators bezeichnet (vgl. den Artikel „Kapazität“). Andererseits ist der Strom i nichts anderes als die Elektrizitätsmenge, die in der Zeiteinheit von

A nach B gelangt, d. h. $i = -\delta P/\delta t$. Dies beides hat man in (16) einzuführen. Das Ergebnis der Rechnung ist dieses: Sei auf irgendeine Weise der Kondensator auf $\pm P_0$ geladen, und dann der Leiterkreis sich selbst überlassen. Dann gleichen sich stets die Ladungen durch den verbindenden Leiter aus; aber dies kann in sehr verschiedener Weise geschehen. Alles hängt davon ab, wie sich die Zeitkonstante p/w zu dem Produkt cw verhält, das ebenfalls eine bestimmte Zeit darstellt (c ist Elektrizitätsmenge/Spannung, w ist Spannung/Strom, also cw = Elektrizitätsmenge / Strom = Strom × Zeit / Strom). Ist $p/w < 1/4 . cw$, dann fließt der Strom dauernd von der positiv geladenen Platte zur negativ geladenen, bis die Ladung erschöpft ist. Ist speziell p/w sehr klein gegen cw, dann findet die Entladung gemäß einer einfachen Exponentialkurve statt; es wird

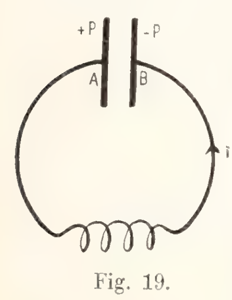


Fig. 19.

$$P = P_0 . e^{-\frac{t}{cw}} \qquad 20)$$

Ist dagegen $p/w > 1/4 . cw$, so strömt zunächst nicht nur die Ladung P_0 nach B über, sondern mehr, so daß nach einer gewissen Zeit B positiv, A negativ geladen ist, freilich nicht mit dem vollen Betrage $+P_0$ bezw. $-P_0$. Dann erst geht der Strom nach A zurück, und zwar so lange, daß wiederum A positiv geladen wird. So geht das Spiel weiter, wobei die Dauer eines Hin- oder Hergangs stets dieselbe bleibt, die Größe der Ladung aber jedesmal kleiner wird. Oder anders ausgesprochen: der Strom wechselt Größe und Richtung in Schwingungen von abnehmender Amplitude. — Ist schließlich speziell p/w groß gegen cw, dann sind die Schwingungen schwach gedämpft, und die Dauer eines Hin- und Hergangs ist

$$T = 2\pi . \sqrt{pc} \qquad 21)$$

(Genaueres siehe im Artikel „Elektrische Schwingungen".)

2g) Zwei gekoppelte Leiterkreise. Stromstoß. Wir betrachten jetzt zwei ruhende lineare Stromkreise, die ohne leitende Verbindung sind. Nur in einem von ihnen, dem „primären" Kreis, soll eine gegebene elektromotorische Kraft $\mathcal{E}_1$ vorhanden sein; der andere, der „sekundäre" Kreis, soll lediglich durch Induktion einen Strom erhalten. Das setzt voraus, daß beide Stromkreise „magnetisch gekoppelt" sind (s. unter 1n). Diese Koppelung bedingt aber gegenseitige Induktion; der Strom im sekundären Kreis wirkt induzierend auf den primären zurück. Dadurch wird die vollständige Darstellung recht verwickelt. Einige wichtige Resultate aber lassen sich ohne viel Rechnung ableiten.

Zunächst mag im primären Kreis eine konstante elektromotorische Kraft $\mathcal{E}_1$ gegeben sein durch galvanische Elemente; wir wollen diesen Stromkreis schließen oder öffnen und die Wirkung auf den sekundären Kreis ins Auge fassen. Der ganze veränderliche Zustand beschränkt sich hier auf ein gewisses, im allgemeinen sehr kurzes Zeitintervall, das wir τ nennen wollen. Vorher und nachher ist der sekundäre Strom $= 0$. Der primäre Strom hat beim Schließungsvorgang vorher den Wert 0, nachher den stationären Wert $i_1 = \mathcal{E}_1/w_1$; umgekehrt beim Oeffnungsvorgang. Während des veränderlichen Zustands nimmt nun die Gleichung (14) für den sekundären Kreis die Form an: $w_2 i_2 . \delta t = -\delta Q$, und hierin bedeutet Q die gesamte Induktion, welche den sekundären Kreis durchdringt. Sie setzt sich zusammen aus den Anteilen, welche vom primären Strom i_1 und vom sekundären Strom i_2 herrühren. Fassen wir die ganze Zeit τ und die ganze Aenderung, welche Q in ihr erfährt, zusammen. Was von i_2 herrührt, ist zu Anfang wie zu Ende $=0$, also ist auch die Aenderung $=0$. Was von i_1 herrührt, ist bei der Schließung zu Anfang $=0$, zu Ende $Q_1 = p_{12} . \mathcal{E}_1/w_1$ (wo p_{12} wieder den wechselseitigen Induktionskoeffizienten bezeichnen soll); — bei der Oeffnung umgekehrt. Also folgt, wenn das Zeichen $\int$ „Summe" bedeutet:

$$\begin{aligned} w_2 . \int i_2 . \delta t &= -\int \delta Q_i \\ &= + Q_1 = \mp p_{12} . \mathcal{E}_1/w_1 \end{aligned} \qquad 22)$$

für Schließung bezw. Oeffnung.

Nun bedeutet $i_2 . \delta t$ die Elektrizitätsmenge, die in der Zeit δt durch den sekundären Leiter fließt, die Summe also die gesamte Elektrizitätsmenge, welche ihn bei dem Vorgang durchströmt. Man bezeichnet sie wohl als den „Integralstrom", oder wenn es sich um sehr kurze Zeiten handelt, als „Stromstoß". Ein solcher Stromstoß wird gemessen durch den Ausschlag eines ballistischen Galvanometers. (Vgl. den Artikel „Magnetfeld".) Seine Größe wird aber in unserem Falle durch die Selbstinduktion des sekundären Kreises gar nicht beeinflußt, sie hängt auch vom zeitlichen Verlauf des primären Stroms nicht ab. Aus der Messung folgt vielmehr nach (22) direkt der Wert der wechselseitigen Induktion Q_1.

Eine Anwendung: Denken wir uns als primären Kreis eine lange Spule, als sekun-

dären Kreis eine kurze Spule, die die erste umgibt; dann kann die Größe Q_1, die gemäß (22) gemessen werden kann, andererseits nach (12) berechnet werden. Sie ist nach dieser Gleichung proportional mit der Permeabilität μ des Körpers, der die lange Spule ausfüllt; sei dies in einem ersten Versuch Eisen, in einem zweiten Luft, so ergibt sich also die Permeabilität des Eisens als das Verhältnis der beiden Stromstöße.

Schnell abwechselnde Schließungen und Oeffnungen des primären Stromes werden in den Induktionsapparaten mechanisch hervorgebracht. Dadurch entstehen alternierende Schließungs- und Oeffnungsströme im sekundären Kreis. Nach (22) ist ihre Richtung entgegengesetzt, ihre gesamte Elektrizitätsmenge die gleiche. Ihr zeitlicher Verlauf aber ist außerordentlich verschieden; denn die induzierte elektromotorische Kraft ist in jedem Augenblick durch die Aenderungsgeschwindigkeit von Q gegeben. Nun steigt bei der Schließung der primäre Strom und damit seine Induktion allmählich zum stationären Wert an; bei der Oeffnung aber wird er plötzlich auf 0 herabgedrückt; nur der „Oeffnungsfunke" verbindet noch für kurze Zeit die mechanisch getrennten Leitungsenden. Alle Wirkungen, die durch hohe elektromotorische Kraft im sekundären Kreis — wenn auch nur während sehr kurzer Zeit — bedingt sind, wie die Durchbrechung von Luftstrecken beim Funkeninduktor, sind daher Wirkungen des Oeffnungsstromes.

2h) Transformator für Wechselstrom. Es mag nun das System der beiden gekoppelten Kreise aus zwei Spulen auf dem gleichen Eisenring bestehen. Es sollen die gleichen Bezeichnungen gelten, wie in 1n, und es soll ferner die Spannung an den Enden der primären Spule $\mathcal{E}_1$, diejenige an den Enden der sekundären Spule $\mathcal{E}_2$ heißen. $\mathcal{E}_1$ betrachten wir als gegeben (vgl. unter 2d), $\mathcal{E}_2$ suchen wir. $\mathcal{E}_1$ mag wieder sinusförmig periodisch sein. Dann wird auch das magnetische Feld im Ringkörper periodisch, mit der gleichen Wechselzahl, — und ebenso also der Induktionsfluß, der jeden Ringquerschnitt durchsetzt. Er heiße q; dann ist der gesamte Induktionsfluß durch alle Windungen der primären Spule N_1q, und derjenige durch alle Windungen der sekundären Spule N_2q. Die Abnahme des Induktionsflusses in der Zeiteinheit aber gibt jedesmal die induzierte elektromotorische Kraft, und diese zusammen mit der äußeren Spannung ist nach (14) $=i_1w_1$ bezw. $=i_2w_2$. Nun ist aber dieser Spannungsverlust durch Ohmschen Widerstand, wie in dem einfacheren Fall der einzelnen Spule und aus den gleichen Gründen (vgl. unter 2d) praktisch unmerklich. Die beiden Spannungen verhalten sich daher wie die induzierten elektromotorischen Kräfte, d. h. wie die Aenderungen von N_1q und N_2q in der Zeiteinheit, d. h. wie die beiden Windungszahlen:

$$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} = \frac{N_2}{N_1} \qquad 23)$$

Die Anordnung heißt ein „Transformator"; sie transformiert die gegebene Spannung $\mathcal{E}_1$ des primären Kreises herauf oder herab, je nachdem die Windungszahl N_2 des sekundären Kreises größer oder kleiner ist, als die Windungszahl N_1 des primären Kreises.

2i) Wirbelströme. Bisher haben wir ausschließlich die Induktion in linearen Leitern behandelt. Induktionsströme treten aber überall auf, wo in Leitern ein veränderliches magnetisches Feld vorhanden ist, und für jede geschlossene Kurve im Leiter gilt das Grundgesetz (13): die induzierte elektromotorische Kraft ist gleich der Abnahme des Induktionsflusses in der Zeiteinheit. Nur sind bei einem allseitig ausgedehnten Leiter die Strombahnen nicht von vornherein bekannt; sie müssen vielmehr erst aus eben diesem Gesetz bestimmt werden. Das ist nie eine elementare, und meistens eine in Strenge unlösbare Aufgabe. Aber eines gilt allgemein auch für diese „Wirbelströme" und wie auch ihre Bahnen verlaufen mögen: sie erzeugen Wärme („Joulesche Wärme") im Leiter. Und deshalb sind sie — abgesehen von gewissen besonderen Fällen, die unten besprochen werden sollen — parasitäre Gebilde: sie zehren von der Energie, die anderen Zwecken zugedacht ist. Sie müssen nach Möglichkeit vermieden werden. In den Drosselspulen, Induktorien, Transformatoren würde der Eisenkern, wenn er massiv wäre, den Sitz von Wirbelströmen bilden; denn bei jeder Stromschwankung zucken in ihm die magnetischen Kraftlinien. Wenn man aber das Eisen in ein Bündel von Drähten oder auch nur in einen Stapel von Blechen so auflöst, daß jede Kraftlinie in einem Draht oder Blech verläuft, dann finden die Kraftlinien ihre Bahnen frei wie zuvor: die gewünschte Folge der Eisenfüllung bleibt bestehen. Aber um diese Kraftlinien herum gibt es keine geschlossenen Bahnen von größerer Ausdehnung mehr, die in Metall verlaufen: die nicht gewünschten Wirbelströme sind ausgeschlossen. In dieser Weise wird daher das Eisen „unterteilt".

2k) Skineffekt. Elektromagnetische Strahlung. Wir haben soeben zwischen linearen und allseitig ausgedehnten, „körperlichen" Leitern unterschieden. Der Unterschied ist aber offenbar nur graduell. Jeder Kupferdraht ist in Wahr-

heit ein körperlicher Leiter; wenn wir ihn als „linear" behandelten, so bedeutete das nur (vgl. unter 1a), daß lediglich der Gesamtstrom, nicht aber seine Verteilung über den Querschnitt für uns Bedeutung hat. Das gilt nun offenbar, wo es sich um die Wirkungen des Stromes in größerer Entfernung handelt. Es gilt aber nicht mehr für das Feld im Leiter selbst und in seiner unmittelbaren Nachbarschaft, also nicht für die Selbstinduktion. Es gilt vor allem nicht für diejenige Stromwirkung, die sich ganz auf das Innere des Leiters beschränkt, die Joulesche Wärme, oder mit anderen Worten für den Widerstand. Um diese Größen beurteilen zu können, muß man die Stromverteilung im Querschnitt des Drahts kennen. Man stellt sich nun gewöhnlich vor, daß die Strömung den Querschnitt gleichmäßig erfüllt. Das ist aber allgemein nicht richtig: es trifft streng nur zu für stationäre Strömung; es ist lediglich eine brauchbare Annäherung bei den langsamen Wechselströmen der Dynamomaschinen; es ist sehr weit von der Wahrheit entfernt bei den schnellen Wechselströmen, wie sie etwa die drahtlose Telegraphie in Sender und Empfänger aufweist. Je schneller die Stromschwankungen sind, um so mehr beschränkt sich die Strömung auf die Oberflächenschichten des Drahts; die axialen Teile bleiben stromlos. Man bezeichnet diese Erscheinung als „Hautwirkung" oder „Skineffekt"; man sieht in ihr eine elektrodynamische Schirmwirkung, welche von der Oberflächenströmung ausgeht und das Innere des Drahts vor elektrischen und magnetischen Kräften schützt. Hierin liegt offenbar die Auffassung, daß diese Kräfte etwas darstellen, was von der Drahtoberfläche zur Drahtachse, — nicht etwa von einem Drahtquerschnitt zum anderen — vordringt. Diese Auffassung ist berechtigt. Um sie zu verstehen, müssen wir uns mit dem Begriff der elektromagnetischen Strahlung beschäftigen.

Der Begriff „Strahlung" ist uns im Gebiet der Optik vertraut und unmittelbar anschaulich. In einfachster und reinster Form finden wir sie im leeren Raum. Dort breitet sie sich mit bestimmter Geschwindigkeit aus — der Lichtgeschwindigkeit — und mit unverminderter Energie. Nur verteilt sich diese Energie bei der Ausbreitung auf immer größere Raumbezirke. Es verlaufen weiter in einem Lichtstrahl periodische Vorgänge, — das lehren die Interferenzerscheinungen; und was sich periodisch ändert, das hat eine zum Strahl senkrechte Richtung, — das lehren die Polarisationserscheinungen. Beides zusammen drücken wir aus, indem wir sagen, das Licht breite sich in „transversalen Wellen" aus. Nicht sehr verschieden hiervon ist die Strahlung in durchsichtigen Körpern, wie Luft, Glas; auch hier dürfen wir in der Regel von der Schwächung der Strahlung absehen, und dann bleibt als optisches Unterscheidungsmerkmal gegenüber dem leeren Raum nur die geänderte Fortpflanzungsgeschwindigkeit; sie wird durch den Brechungsexponenten bestimmt. Wenn nun aber diese Strahlung auf einen undurchsichtigen „schwarzen" Körper fällt, etwa Ruß, so wird sie absorbiert. Die Strahlung verschwindet, und es entsteht Wärme. Daraus schließen wir, daß sich auf den Wegen der Strahlung Energie ausbreitet; wir messen den Betrag dieser Energiestrahlung, indem wir die Wärmemenge messen, die in der Zeiteinheit von ihr geliefert wird.

Nun hat Heinrich Hertz bewiesen, — was Maxwell vorausschauend behauptet hatte, — daß gerade so, wie es vom Licht seit lange bekannt war, sich auch periodisch wechselnde elektrische und magnetische Kräfte im leeren Raum ausbreiten: in transversalen Wellen und mit Lichtgeschwindigkeit. Transversal — zur Fortpflanzungsrichtung senkrecht — sind hier die elektrische und die magnetische Feldstärke, in der Polarisationsrichtung im besonderen liegt die magnetische. Nicht wesentlich anders ist die Ausbreitung in beliebigen Isolatoren. Daraus war zu schließen: was wir als Lichtausbreitung durch unser Auge wahrnehmen, das ist die Ausbreitung periodisch wechselnder elektrischer und magnetischer Kräfte von bestimmter sehr hoher Schwingungszahl. Unser Auge reagiert auf solche Schwingungen, wenn die Schwingungszahl zwischen etwa 400 und 700 Billionen in der Sekunde liegt; dieses Reagens versagt, wenn die Schwingungszahl in einem anderen Gebiet liegt, sonst aber unterscheiden sich beliebig langsame elektromagnetische Schwingungen nicht von Lichtschwingungen. — Das ist die Aufklärung, die wir in der Richtung der Optik erhalten. Nicht minder wichtig ist die Aufklärung in der Richtung der Elektrik: Die Ausbreitung periodisch wechselnder Felder ist eine spezielle elektromagnetische Erscheinung, eine spezielle Folgerung aus Maxwells Gleichungen. Diese Gleichungen zeigen aber: die Ausbreitung elektromagnetischer Energie — die Strahlung — ist eine ganz allgemeine Erscheinung; sie existiert, wo immer elektrische und magnetische Kräfte gleichzeitig vorhanden sind, gleichviel ob diese schnell oder langsam oder auch gar nicht wechseln, und gleichviel ob es sich um Isolatoren oder um Leiter handelt. Und stets erfolgt die Energiestrahlung in der Richtung, die zugleich zur elektrischen Kraft E und zur magnetischen Kraft H senkrecht ist. Genauer:

die Strahlung hat die Richtung der Achse, für welche die Drehung von E nach H eine positive Drehung ist, und die Größe der Strahlung, für die Fläche 1 und die Zeit 1 berechnet, ist stets

$$\Sigma = \frac{1}{4\pi} . EH . \sin(EH) \qquad 24)$$

Betrachten wir von diesem Gesichtspunkt aus den wohlbekannten Vorgang der stationären Strömung in einem geradlinigen Stück eines Drahts. Seine Länge sei l, sein Radius r, sein Widerstand w, die Spannung („Potentialdifferenz") zwischen seinen Enden $\mathfrak{E}$. Dann ist $E = \mathfrak{E}/l$, ferner an der Oberfläche (vgl. den Artikel „Magnetfeld") $H = 4\pi i/(2\pi r)$. Zudem ist E parallel der Drahtachse in der Stromrichtung, H tangential, in positivem Sinn die Stromrichtung umkreisend. Also ist nach (24): $\Sigma = \mathfrak{E} i/(l . 2\pi r)$ und weist radial nach innen (s. Figur 20). Aber $l . 2\pi r$ ist die Oberfläche O des betrachteten Zylinders, also strömt in dieses Drahtstück in der Zeiteinheit die Energie $\Sigma . O = \mathfrak{E} i$ durch die Zylinderfläche. Durch die senkrechten Querschnitte strömt nichts; denn Σ ist senkrecht zu E, und E liegt senkrecht zum Querschnitt. $\mathfrak{E} i$ ist also die ganze Einströmung; es ist aber zugleich nach Ohms Gesetz $iw = \mathfrak{E}$, und nach Joules Gesetz $i^2 w = i\mathfrak{E}$ die Wärme, die in dem Drahtstück entsteht. Also: Energiezufuhr durch Strahlung und Energieverbrauch durch Wärme gleichen sich in jedem Moment aus. Das muß so sein; denn anderenfalls wäre der Zustand ja nicht unveränderlich. Aber weiter: betrachten wir nicht das ganze Drahtstück, sondern nur einen bestimmten inneren Teil, der durch eine koaxiale Zylinderfläche O′ vom Radius r′ begrenzt wird. Der Strom im inneren Zylinder heiße i′, der Querschnitt q′, während der ganze Querschnitt q sei. Dann ist hier wie oben $E = \mathfrak{E}/l$, aber $H = 4\pi i'/(2\pi r')$ und $i'/i = q'/q$. Die Strahlung wird also hier $\Sigma' = \mathfrak{E} i'/(l . 2\pi r')$, wo $l . 2\pi r' = O'$ ist. Somit strömt in diesen Kern nur noch ein: $\Sigma' . O' = \mathfrak{E} i' = \Sigma . O . q'/q$. Man sieht: indem die Strahlung zur Achse vordringt, nimmt sie bis zu Null ab; sie wird schrittweise in Joulesche Wärme umgesetzt.

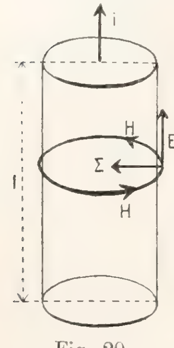


Fig. 20.

Alles dies gilt merklich auch noch dann, wenn die Strömung nicht mehr stationär ist, aber sich genügend langsam ändert; — wenn sie sich so langsam ändert, daß das ganze elektrische und magnetische Feld merklich im gleichen Rhythmus pulsiert. Genau ist das nie der Fall; das Feld braucht ja Zeit zur Ausbreitung. Wie es sich in Isolatoren ausbreitet, davon war oben die Rede: wie das Licht. Ganz anders in Leitern. Hier erfolgt die Ausbreitung — das ist ebenfalls in Maxwells Gleichungen enthalten und ebenfalls durch Versuche erwiesen — wie die Ausbreitung der Temperaturen in einem wärmeleitenden Körper. Wie diese bei periodischen Temperaturänderungen der Oberfläche vor sich geht, dafür haben wir ein Beispiel in den täglichen und jährlichen Temperaturschwankungen in der Erdrinde. Beide periodische Schwankungen dringen wellenförmig ins Innere vor, und bei beiden nimmt die Stärke der Schwankung mit wachsender Tiefe ab. Aber quantitativ verhalten sich die beiden Wellen sehr verschieden. Die jährlichen Schwankungen sind in der Tiefe von $8\frac{1}{2}$ m auf einen bestimmten kleinen Bruchteil ($^1/_{23}$) der Oberflächenschwankungen herabgesunken; bis auf denselben Bruchteil sind die täglichen Schwankungen bereits in $^1/_{19}$ von $8\frac{1}{2}$ Meter erloschen. Ebenso steht es mit jeder willkürlich gewählten Größe der Schwankung. Die Tiefen, in denen gleiche Bruchteile der Oberflächenschwankungen noch vorhanden sind, verhalten sich, wie die Wurzeln aus der Größe der Perioden (hier $\sqrt{365/1} = 19$). Das gilt nun genau so für das Eindringen periodisch wechselnder elektromagnetischer Kräfte in das Innere von Leitern. Des weiteren hängt die Schnelligkeit des Erlöschens natürlich vom Material des Leiters ab, und zwar ergibt die Theorie, daß alles durch die eine Größe $l = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{T}{\lambda\mu}}$ bedingt ist, wo λ das elektrische Leitungsvermögen, μ die Permeabilität, T die Dauer einer Periode bezeichnen soll. Diese Größe ist ihrer Dimension nach eine Länge, und zwar bedeutet sie die Tiefe, in der nur noch rund $^1/_{23}$ der Oberflächenschwankung vorhanden ist; in der doppelten Tiefe existiert nur noch $^1/_{23}{}^2$ oder (genauer) $^1/_{535}$, und so fort.

Kehren wir jetzt zu dem Draht zurück, in dem elektrische Wechselströme fließen. Wenn l sehr groß ist gegen seinen Radius, dann wird die Schwankung auf dem Wege von der Oberfläche bis zur Achse nur unmerklich abnehmen; dann ist also der Draht in seinem ganzen Querschnitt merklich gleichmäßig durchströmt, — wie es in Strenge bei einem stationären Strom der Fall ist. Wenn aber l klein ist gegen den Drahtradius, dann ist die Schwankung bereits merklich erloschen, nachdem der Energiestrom eine verhältnismäßig dünne Rindenschicht durchsetzt hat. Einige Zahlen zur Veranschaulichung: es handle sich zunächst um die technische Wechselzahl 100. Dann ist für Kupfer rund $l = 3$ cm; für Eisen von der

Permeabilität 1000 rund $l = \frac{1}{4}$ cm. Daraus folgt: ein Kupferdraht von 1 mm Radius wird merklich gleichmäßig durchströmt, ein Eisendraht von gleichem Radius aber schon nicht mehr. Wie dieser Eisendraht, würde sich ein Kupferzylinder von 12 mm Radius verhalten. In einem Eisenzylinder von 12 mm Radius aber beschränkt sich die Strömung schon merklich auf eine verhältnismäßig dünne Rindenschicht; in der Tiefe von 2,5 mm ist sie bereits auf $^1/_{23}$ des Oberflächenwertes abgesunken.

Nehmen wir aber eine Million Stromwechsel in der Sekunde an, — das entspricht etwa den Verhältnissen der drahtlosen Telegraphie, — dann wird für Kupfer rund $l = 0{,}03$ cm. Dann ist also die Strömung in einem Kupferdraht schon in einer Tiefe von einigen Zehntel mm praktisch erloschen. Ein Kupferniederschlag von solcher Dicke, etwa auf einem Glasfaden, leistet also für die Stromleitung dasselbe, wie ein massiver Kupferdraht. Anders ausgedrückt und genauer: ein Kupferdraht von 1 mm Radius besitzt für unseren Wechselstrom einen rund 6mal so großen Widerstand wie für stationären Strom.

2l) Induktion durch Bewegung. Lenzsche Regel. Wir wollen jetzt die Fälle untersuchen, in denen ein Induktionsstrom durch Bewegung entsteht. Es mag zunächst ein linearer Leiter von unveränderlicher Form seine Lage gegenüber anderen Leitern oder gegenüber Magneten ändern. Der durch die Bewegung induzierte Strom ist nach (13) und (14)

$$i = -\frac{1}{w} \cdot \frac{\delta^1 Q}{\delta t} \qquad 25)$$

wenn $\delta^1 Q$ die im Zeitelement δt eintretende Aenderung von Q bezeichnet, die der Bewegung entstammt. Neben diese Gleichung stellen wir den Ausdruck für die Arbeit, die bei der Bewegung eines Stromträgers gegen ein äußeres Feld von den elektrodynamischen Kräften geleistet wird. Sie ist nach (1): $A = i \cdot \delta^1 Q$. Verstehen wir hier unter i den Induktionsstrom der Gleichung (25), so ergibt sich

$$A = -i^2 w \cdot \delta t \qquad 26)$$

Das ist stets eine negative Größe. Also: die Bewegung erzeugt einen Strom, und der Träger dieses Stromes wird nun von Kräften ergriffen, welche bei der Bewegung negative Arbeit leisten, — d. h. welche der Bewegung entgegenwirken. Das ist die „Lenzsche Regel“. Da sie keinerlei Voraussetzungen über die Form der Strombahnen oder über sonstige geometrische Verhältnisse enthält, so gilt sie offenbar auch für ein beliebiges Aggregat linearer Ströme, also für einen Leiter beliebiger Form, in dem Induktionsströme von beliebiger unbekannter Verteilung entstehen, — Wirbelströme nach der schon früher benutzten Bezeichnung. Diese Bemerkung führt zu folgendem Demonstrationsversuch: Ein Pendel, aus Kupferblech gebildet, kann zwischen den Polen eines Elektromagneten hindurchschwingen. Solange der Elektromagnet nicht erregt ist, sind die Schwingungen des Pendels nur schwach gedämpft; sobald aber der Magnet erregt wird, bewegt sich das Pendel so, als ob es eine zähe Flüssigkeit durchschneiden müßte; es kommt sofort zur Ruhe. In gleicher Weise werden die Schwingungen einer Galvanometernadel durch eine sie umgebende Kupferhülse gedämpft.

2m) Induktionsströme und Arbeit. Generator und Motor. Unsere Gleichungen lassen aber eine noch viel weiter gehende Folgerung zu. Zwei verschiedene Größen: die Arbeit, die bei der Bewegung eines stromdurchflossenen linearen Leiters im Magnetfeld geleistet wird einerseits, — die elektromotorische Kraft, die in dem Leiter durch die Bewegung erzeugt wird andererseits, hängen beide in ganz gleicher Weise von derselben dritten Größe ab: der Veränderung, welche die Induktion durch die Leiterkurve bei der Bewegung erfährt; dieser sind sie beide proportional. In jedem Fall also, wo wir die Arbeit für den einen Vorgang gefunden haben, kennen wir sofort auch den Induktionsstrom für den anderen. Insbesondere: wenn ein gegebener konstanter Strom nach (1) eine konstante Kraft (ein konstantes Drehmoment) erzeugt, so bedeutet das, daß Q sich bei gleichen Verschiebungen (Drehungen) um gleiche Beträge ändert; dann aber erzeugt nach (13) umgekehrt eine gleichförmige Verschiebung (gleichförmige Drehung) eine konstante elektromotorische Kraft.

α) In einem Leiterkreis mit Gleitschiene (vgl. Fig. 6) werde durch äußere Kräfte die Schiene nach außen geschoben. Dann entsteht ein Strom in der dem Pfeil entgegengesetzten Richtung; seine Stärke ist $i = (1/w) \cdot Bdv$, wo $v = l/t$ die konstant gedachte Geschwindigkeit der Verschiebung ist.

β) (Vgl. Fig. 3.) Ein ebener Leiterkreis, drehbar um eine in seiner Ebene liegende Achse, befinde sich in einem gleichförmigen Felde. In zwei Lagen, die durch eine Drehung von 180° ineinander übergehen, durchsetzt ihn, absolut genommen, eine maximale Induktion Q_0. Für eine bestimmte Umlaufsrichtung im Leiter — nennen wir sie die positive — ist aber diese Induktion in der einen Lage positiv, in der anderen negativ zu rechnen. Wird der Leiter aus der ersten Lage in die zweite gedreht, so nimmt also die Induktion um $2Q_0$ ab; es fließt demnach durch den Leiter in positiver Richtung

der „Integralstrom“ $2Q_0/w$. Das Feld sei das Erdfeld, der Leiter, der die Fläche S umspannen soll, werde a) um eine vertikale Achse gedreht, dann ist Q durch die horizontale Komponente H des Erdfeldes bestimmt; es ist $Q_0=HS$. Es werde b) der Leiter um eine horizontale Achse gedreht; dann ist $Q_0=ZS$, wenn Z die vertikale Komponente des Erdfeldes bezeichnet. Indem man die Stromstöße bei a) und b) vergleicht, erhält man also das Verhältnis Z/H, und dies ist die trigonometrische Tangente des Winkels, den das Erdfeld mit der Horizontalen bildet. So bestimmt man mittels des „Erdinduktors“ die „erdmagnetische Inklination“. (Vgl. den Artikel „Magnetfeld der Erde“.)

γ) Der Leiterkreis in β) werde in dauernder gleichmäßiger Rotation erhalten mit n/2 Umdrehungen in der Sekunde. Dann wechselt die induzierte elektromotorische Kraft ihre Richtung jedesmal, wenn die Lage größter oder kleinster Induktion durchschritten wird, also mit der Wechselzahl n. Wir haben einen „Wechselstrom-Generator“, er bildet das Gegenstück zum „Wechselstrom-Motor“ (s. 1e).

δ) Der bewegliche Radius der Figur 8; die Scheibe oder der Bügel in Figur 9; der Magnet oder der Bügel in Figur 10 werde durch Arbeitsaufwand in gleichmäßiger Rotation erhalten. Das Magnetfeld sei gegeben, wie es unter 1 vorausgesetzt wurde. Dann entsteht in jedem Fall in dem linearen Leiter ein Induktionsstrom von konstanter Größe und Richtung. Wir haben Modelle von „Gleichstrom-Generatoren“ vor uns, die Gegenstücke zu den „Gleichstrom-Motoren“ des Abschnittes 1 (unter f, g, h). Die letztgenannte Anordnung im besondern wird als „Unipolarmaschine“ bezeichnet.

Wenn man nach dem hier in Abschnitt 2 angegebenen Prinzip durch Arbeit einen Strom erzeugt, und diesen Strom benutzt, um an einer beliebig entfernten Stelle nach dem unter 1 erläuterten Prinzip Arbeit zu gewinnen, so hat man das, was herkömmlich „elektrische Kraftübertragung“ genannt wird. Entsprechen Generator und Motor dem Typus γ), so findet diese Uebertragung durch Wechselstrom statt: sie ist in dieser Form nur möglich, wenn die beiden Maschinen synchron, d. h. mit gleicher Umdrehungszahl laufen. — Von dieser störenden Bedingung frei sind diejenigen Maschinen, welche als Generatoren bei gleichförmigem Umlauf nahezu konstanten Strom liefern, und als Motoren durch konstanten Strom ein nahezu konstantes Drehmoment erhalten. Das ist der Typus der Gramme'schen Maschine. — Eine ideale Gleichstromübertragung würden Maschinen vom Typus δ) liefern; sie ist aber technisch nicht durchführbar gewesen.

2n) Drehfeldmotor. Bei allen genannten Typen kann die gleiche Maschine nach Wahl als Motor oder als Generator dienen. Nun gibt es aber noch einen Motor, zu dem der gleichgebaute Generator nicht existiert; er benutzt die bewegungshemmende Wirkung der durch Bewegung hervorgerufenen Induktionsströme. Das klingt paradox; es ist aber zu bedenken, daß Induktionsströme durch relative Bewegung entstehen, und daß sie dann nach der Lenz schen Regel dieser relativen Bewegung entgegenwirken. — Ein Stabmagnet befinde sich in horizontaler Lage unter einer horizontalen Kupferscheibe und werde um eine vertikale Achse gedreht. Dann entstehen Wirbelströme im Kupfer, und diese suchen die Scheibe dem Magneten nachzudrehen. Das Drehmoment existiert, solange eine relative Geschwindigkeit von Magnet und Scheibe vorhanden ist. Erst wenn beide im gleichen Tempo rotierten, würden die Induktionsströme und mit ihnen die Triebkraft verschwinden. In dieser Form ist der Versuch bereits von Arago angestellt worden. Es war das erstemal, daß Wirkungen von Induktionsströmen zum Gegenstand einer wissenschaftlichen Untersuchung wurden. Diese Ströme selbst aber blieben unbekannt; sie wurden erst von Faraday entdeckt. — Hier liegt nun freilich kein praktisch brauchbarer Elektromotor vor, sondern lediglich eine „Kraftübertragung“ vom Magneten auf die benachbarte Scheibe. Aber das Prinzip eines Motors ist gegeben; denn nicht, daß der körperliche Magnet sich

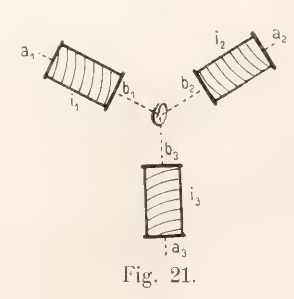


Fig. 21.

dreht, ist wesentlich, sondern lediglich, daß sein Feld, sein Kraftliniensystem, sich dreht. Und ein rotierendes Feld kann man ohne rotierende Körper erhalten.

Man denke drei Spulen so angeordnet (Fig. 21), daß ihre Achsen, je Winkel von 120° miteinander bildend, nach demselben Punkt O konvergieren. In ihnen mögen einfach-periodische (sinusförmige) Ströme fließen, die gleich stark, aber in der Phase je um 120° gegeneinander verschoben sind. In O und in

seiner nächsten Nachbarschaft hat das Feld von i_1 die Richtung a_1b_1 und so fort. Man sieht nun leicht: in dem Moment, wo $i_1=0$ ist, sind i_2 und i_3 gleich stark, und das Feld liegt daher in der Mittellinie von a_2b_2 und a_3b_3, d. h. in a_1b_1; nach einer Drittelperiode liegt es in a_2b_2; nach zwei Drittelperioden in a_3b_3; und es hat in diesen drei Momenten die gleiche Stärke. Die genauere Betrachtung zeigt: es hat stets dieselbe Stärke, seine Richtung aber durchläuft während einer Stromperiode einmal die Windrose. Wir erhalten so durch den „Dreiphasenstrom" dasselbe Drehfeld, wie durch den rotierenden Magneten, — und folglich die gleiche Wirkung auf die Kupferscheibe, oder hier besser noch einen Kupferzylinder oder ein System geschlossener Drahtschleifen, das sich zwischen den Spulen befindet. Dieser Strom aber kann an einer beliebig entfernten Stelle erzeugt werden, — freilich nicht in einem Generator, der dem soeben skizzierten Motor gleich ist. Auf den Bau der Maschine, die ihn tatsächlich erzeugt, soll hier nicht eingegangen werden, ebensowenig auf den Abkömmling des Dreiphasen-Motors, den asynchronen Einphasen-Motor. (Vgl. hierzu, zur Gramme schen Maschine, und für die technische Ausführung überhaupt, den Artikel „Dynamomaschinen").

2o) Selbstinduktion bei Bewegung. Wir haben in den vorstehenden Ueberlegungen stets angenommen, daß die Aenderung des Induktionsflusses Q durch die Bewegung der Körper vollständig bestimmt ist. Das trifft im allgemeinen nicht zu: sobald Q sich ungleichförmig ändert, ergibt sich nach den Grundgleichungen (13) (14) ein veränderlicher Strom, und dieser bedingt Selbstinduktion. Die Selbstinduktion hat im Fall periodischer Bewegungen (vgl. unter 2d) eine Phasenverschiebung zur Folge; d. h. bei der Wechselstrommaschine (2m unter γ) wechselt der Strom nicht in dem gleichen Moment seine Richtung, wo die elektromotorische Kraft dies tut, sondern später. — Bei einem wirklichen Gleichstrom-Motor (2m unter δ) ist natürlich von Selbstinduktion nicht die Rede. — Es folgt aber weiter hier wie früher (s. unter 2g), daß der gesamte, durch eine kurzdauernde Bewegung induzierte „Stromstoß" durch die Selbstinduktion nicht beeinflußt wird. Dies gilt für die Meßmethode 2m unter β und ebenso für die jetzt noch zu besprechende.

2p) Messung des Moments eines Magneten. Ein kleiner Magnet vom Moment K und ein Stromleiter mit dem Strom i mögen aus unendlicher Entfernung in eine bestimmte relative Lage übergeführt werden. Die Arbeit, die dabei geleistet wird, hängt nur von dieser relativen Lage ab: sie kann also berechnet werden als eine an dem Magneten bei der Annäherung an den Stromleiter, oder als eine an dem Stromleiter bei der Annäherung an den Magneten geleistete Arbeit. Es sei in der Endlage H das Feld des Stromes an dem Ort des Magneten, Q die Induktion des Magneten durch die Stromkurve. Dann drückt sich die Arbeit das eine Mal aus als $KH.\cos(KH)$, (vgl. unter 1p), das andere Mal als iQ nach (1). Diese beiden Größen sind also stets einander gleich. — Bilde der Leiter eine lange Spirale mit n Windungen auf der Längeneinheit, und werde der Magnet aus großer Entfernung in deren Mitte so eingeführt, daß seine Achse der Spulenachse parallel ist. Dann ist $H=4\pi ni$, $\measuredangle(KH)=0$, also

$$Q=4\pi n.K \qquad 27)$$

der gesamte Induktionsfluß, den der Magnet durch die sämtlichen Windungen der Spule hindurchsendet. (Der oben angenommene Strom i hat nur zur Berechnung gedient; im Resultat kommt er nicht mehr vor.) Der Stromstoß, der bei der Einführung des Magneten induziert wird, ist nun $Q/w=4\pi n.K/w$; durch ihn kann also das Moment K gemessen werden. — Bisher wurde angenommen, daß es sich um einen permanenten Magneten handelt. Dieselbe Induktion Q und derselbe Stromstoß entsteht aber auch, wenn K das temporäre Moment eines Stückes weichen Eisens ist. Es sei etwa eine zweite, der ersten koaxiale Spule mit n_1 Windungen auf der Längeneinheit und mit dem Strom i_1 vorhanden, die also im Innenraum ein Feld $H_1=4\pi n_1i_1$ erzeugt. Wird nun das Eisenstück plötzlich eingeführt, so mißt man das magnetische Moment K, welches in ihm durch dieses Feld H_1 erregt wurde.

3. Energetik der Induktionsströme.

3a) Die Energiegleichung. Magnetische Energie elektrischer Ströme. Wir gehen aus von der Energiegleichung für stationäre Ströme in ruhenden Leitern. Diese drückt aus, daß die von den inneren Stromquellen, den „Elementen", gelieferte Energie in Wärme („Joulesche Wärme") umgesetzt wird. Sie ist eine unmittelbare Folge des Ohmschen Gesetzes. Dieses lautet in den hier stets benutzten Zeichen: $\mathcal{E}_0=iw$, und daraus ergibt sich

$$i\,\mathcal{E}_0=i^2w. \qquad 28)$$

Hier steht links die in der Zeiteinheit gelieferte Energie, die „Leistung" der Stromquelle (L), rechts die Joulesche Wärme (J):

$$L=J \qquad 28a)$$

Handelt es sich um einen Teil eines Stromkreises ohne innere Stromquellen, so bedeutet (s. unter 2c) $\mathcal{E}_0$ die Spannung zwischen den Enden, und $i\mathcal{E}_0=L$ die dem Leiterteil von außen in der Zeit 1 zugeführte Energie.

Bewegen wir nun einen Magneten gegen den Stromkreis; dann wird Arbeit geleistet. Es tritt im Verbrauch ein neuer Energieposten auf; die Energiebilanz der Gleichung (28) kann nicht mehr stimmen, und folglich auch nicht die Gleichung, aus der diese hervorgegangen ist. Wir können nach (1), dem Grundgesetz in Abschnitt 1, die Arbeit angeben; sie ist in der Zeit δt: $i . \delta Q$, falls δQ die Vermehrung des Induktionsflusses in der Zeit δt bezeichnet, und folglich in der Zeit eins: $A = i . \delta Q/\delta t$. Wir werden jetzt ansetzen müssen:

$$L = J + A \tag{29}$$

oder mit Einsetzung aller Werte: $i\mathcal{E}_0 = i^2 w + i . \delta Q/\delta t$. Daraus folgt aber: $\mathcal{E}_0 - \delta Q/\delta t = iw$, d. h. die Gleichung (14), das Grundgesetz in 2. Es scheint also, daß man dieses Gesetz aus dem Energieprinzip, wie soeben geschehen, ableiten kann. Dann hätte es des Experimentators Faraday nicht bedurft; der Rechner hätte ihn ersetzen können, sobald ihm nur die älteren Erfahrungen, die in 1 dargestellt sind, zu Gebot standen. Dem ist nicht so. Man braucht sich ja nur der Induktionsströme zu erinnern, die ohne irgendwelche Bewegungen zustande kommen. Hier kann Arbeit nicht geleistet werden, aus (29) würde wieder: $L = J$, und diese Gleichung ist unverträglich mit dem Induktionsgesetz der Gleichung (14). Es kann also auch (29) nicht die allgemeine Form der Energiegleichung sein; es müssen noch andere Energieposten in Betracht kommen.

Denken wir an den oben behandelten Fall (vgl. (17b) und Fig. 16 rechts): aus einem Leiterkreis, in dem der konstante Strom i fließt, wird die Stromquelle plötzlich ausgeschaltet, während der Stromkreis geschlossen bleibt. Der Strom verschwindet dann nicht momentan, sondern fällt allmählich zu Null ab. Solange er fließt, entsteht Joulesche Wärme; es muß also ein Energievorrat vorhanden sein, der von den Vorgängen in der Stromquelle unabhängig ist, der lediglich an das Bestehen des Stromes geknüpft ist. Ein solcher existiert in der Tat: zu jedem Strom gehört ein bestimmtes magnetisches Feld, und jedes magnetische Feld repräsentiert einen bestimmten Energievorrat (vgl. den Artikel „Magnetfeld"). Für diese letztere Abhängigkeit läßt sich das Gesetz ganz allgemein angeben: Es sei wieder H die Feldstärke, μ die Permeabilität an einer gewissen Raumstelle; dann enthält (konstante, vom Feld unabhängige, Permeabilität vorausgesetzt) die Volumeinheit den Betrag

$$w_m = \frac{1}{8\pi} . \mu H^2 \tag{30}$$

an magnetischer Energie. Die gesamte Energie erhält man, indem man diese Größe mit dem Volumelement multipliziert und alle diese Beiträge summiert. Um die magnetische Energie durch die Stromstärke i_1 ausdrücken zu können, muß man offenbar noch im ganzen Raum das Feld H des Stromes i_1 kennen. Wir wählen einen uns bekannten Fall, die Ringspule mit N_1 Windungen, und wollen noch der Einfachheit wegen den Ring als sehr dünn voraussetzen, so daß wir von einer bestimmten Länge l des Ringumfanges sprechen können, die mit dem Querschnitt S multipliziert das Ringvolumen ergibt. Hier ist ein Feld nur im Ringkörper vorhanden, und an allen Stellen des Ringkörpers hat es denselben Betrag (vgl. (5a)) $H = 4\pi N_1 i_1/l$. Also wird die magnetische Energie $W_m = w_m . lS = \mu/(8\pi) . H^2 . lS = 4\pi N_1^2 . \mu S/l . \frac{1}{2} i_1^2$.

Der Faktor von $\frac{1}{2} i_1^2$ ist aber nichts anderes, als der Selbstinduktionskoeffizient p_1 des Stromkreises (s. 9a), und man kann also schreiben:

$$W_m = \tfrac{1}{2} p_1 i_1^2 \tag{31}$$

Diese Beziehung gilt allgemein, unabhängig von der besonderen Form des Stromkreises, für die wir sie hier abgeleitet haben. Also zunächst: jedem Strom gehört eine magnetische Energie zu, die dem Quadrat der Stromstärke proportional ist. Und weiter: der Proportionalitätsfaktor ist die Hälfte des Selbstinduktionskoeffizienten. Diese Energie ist es, aus der die Joulesche Wärme des erlöschenden Stromes geschöpft wird. Diese Energie wird andererseits aufgespeichert, während der Strom eines Elementes vom Wert Null zum stationären Endwert ansteigt (vgl. (17a) und Fig. 16 links). Also nur solange der Strom stationär fließt, deckt die Leistung der Stromquelle rein den Aufwand an Joulescher Wärme; während der Strom ansteigt, hat sie außerdem noch für die entstehende magnetische Energie aufzukommen; während der Strom abnimmt, liefert umgekehrt die verschwindende magnetische Energie (mit der Stromquelle oder, wie oben, allein) Joulesche Wärme. Der Zuwachs dieser Energie in der Zeiteinheit ($\delta W_m/\delta t$) ist es also in jedem Fall, der als Ausgabeposten in der Energiegleichung zu J hinzutritt. Die Energiegleichung lautet demnach für einen gegen seine Umgebung ruhenden Leiter:

$$L = J + \frac{\delta W_m}{\delta t} \tag{32}$$

Das gibt (mit Fortlassung des Index 1), da p sich nicht ändert und $\delta(i^2)/\delta t = 2i . \delta i/\delta t$ ist: $i\mathcal{E}_0 = i^2 w + pi . \delta i/\delta t$ und folglich $iw = \mathcal{E}_0 - p . \delta i/\delta t$, wie wir bereits unter (16) aus dem Induktionsgesetz abgeleitet hatten.

3b) Eine mechanische Analogie mag den Vorgang erläutern. Ein Stein falle in einer zähen Flüssigkeit: dann nimmt seine

Geschwindigkeit zunächst zu, aber nicht unbegrenzt, wie es unter der alleinigen Wirkung der Schwerkraft sein würde, sondern nur bis zu einem bestimmten Wert, der dann erhalten bleibt. Denkt man sich dann durch irgendeinen Mechanismus (etwa Verbindung mit einem gleich schweren Körper durch Schnur und Rolle) die Wirkung der Schwerkraft aufgehoben, so kommt der Stein nicht sofort, sondern erst allmählich zur Ruhe. Während der ganzen Bewegung wird fortwährend Reibungswärme erzeugt. Diese entsteht während der mittleren Periode (der gleichförmigen Bewegung) aus der Arbeit der Schwerkraft und ist ihr äquivalent. Während der ersten Periode (der zunehmenden Geschwindigkeit) liefert die Arbeit ebenfalls Reibungswärme, aber außerdem noch die wachsende kinetische Energie. In der dritten Periode (der abnehmenden Geschwindigkeit) endlich ist eine Kraft, die Arbeit leistet, nicht mehr vorhanden; aber es ist kinetische Energie in dem Körper aufgespeichert; diese wird jetzt verbraucht und in Wärme umgesetzt. Der Vorgang wird auch formal genau durch unsere Gleichungen dargestellt: man muß nur unter i die Geschwindigkeit, unter p die Masse des Steins, unter $\mathfrak{E}_0$ die konstante Schwerkraft, unter w einen Widerstandskoeffizienten verstehen. $W_m = \frac{1}{2}pi^2$ ist dann die kinetische Energie, $L = i\mathfrak{E}_0$ die Arbeit der Schwerkraft in der Zeiteinheit, $J = i^2w$ die Reibungswärme.

Kehren wir nun zu dem allgemeineren Fall zurück, daß auch Bewegungen stattfinden, so müssen wir noch die geleistete Arbeit unter die Ausgabeposten aufnehmen, und die Energiegleichung lautet jetzt:

$$L = J + A + \frac{\delta W_m}{\delta t} \qquad 33)$$

In dieser Form gilt sie nun tatsächlich allgemein, bei beliebig vielen Stromleitern und Magneten, unter der selbstverständlichen Voraussetzung, daß W_m jedesmal die Energie des gesamten magnetischen Feldes bezeichnet. Sie sagt aus, daß die Leistung der Stromquellen verbraucht wird für Joulesche Wärme, für Arbeitsleistung, für Vermehrung der magnetischen Energie.

3c) Wechselstrom in ruhenden Leitern. Transformator. Wir wollen die verschiedenen Induktionserscheinungen jetzt unter dem Gesichtspunkt der Energieumsetzungen betrachten. Zunächst noch einmal einen einzelnen ruhenden Leiter, in dem aber jetzt Wechselstrom pulsieren soll. Die in dem Zeitelement δt von der Stromquelle gelieferte Energie ist $L.\delta t = \mathfrak{E}_0 i.\delta t$. Es ist $\mathfrak{E}_0 = A.\sin(nt)$, $iw' = A.\sin(nt-k)$ (s. (18)). Ist $k=0$, so ist L stets positiv; ist k nicht 0, so ist L zuweilen positiv, zuweilen negativ; ist $k=90^0$, so ist L ebensooft positiv wie negativ. Wir zeichnen eine Kurve, in der t die Abszisse, L die Ordinate ist; dann bedeutet jedes Flächenstück über der Abszissenachse eine verbrauchte, jedes unter der Abszissenachse eine zurückgelieferte Energie. Die Kurven Figur 22 geben $\sin(nt).\sin(nt-k)$ für $k=0^0$, $k=45^0$, $k=90^0$. Im ersten Fall wird alle einmal gelieferte Energie verbraucht; im zweiten nur ein Teil; im dritten Fall in summa nichts. Das hängt so zusammen:

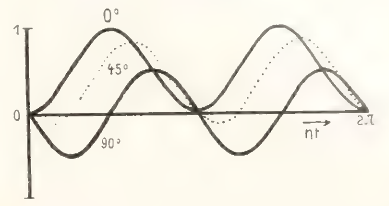


Fig. 22.

Die Energiegleichung lautet $L.\delta t = J.\delta t + \delta W_m$. In ihr ist J stets eine positive Größe, mit wachsender Zeit summieren sich unausgesetzt die entstehenden Wärmemengen. Die magnetische Energie W_m aber schwankt zwischen 0 und einem bestimmten Grenzwert hin und her; während einer Periode ist ihre Gesamtzunahme Null. Im ganzen also wird die Leistung der Stromquellen nur für Joulesche Wärme verbraucht; daneben wird in periodischem Wechsel magnetische Energie aufgespeichert und wieder ausgenutzt. Nun sahen wir aber (vgl. unter 2d), daß bei einer „Drosselspule" der Ohmsche Widerstand w, von dem die Joulesche Wärme abhängt, nur einen ungeheuer kleinen Bruchteil der Impedanz w' ausmacht, die die Stromstärke bedingt. In dem gleichen Verhältnis wirkt die Drosselspule ökonomischer als ein induktionsfreier Widerstand, der den gleichen Strom ergeben würde. Wir haben hier von den letzten unvermeidlichen Resten der Wirbelströme, und ebenso von der „Remanenz" oder „Hysteresis" des Eisens abgesehen. Auf ihr beruht wesentlich der tatsächliche Energieverbrauch der Drosselspule und des Transformators (vgl. die Artikel „Magnetische Eigenschaften der Stoffe" und „Transformatoren").

Wie verhält es sich nun, wenn zwei Ströme i_1 und i_2 zugleich vorhanden sind? Dann bedeutet in dem Ausdruck (30) für die Energiedichte H das resultierende Feld, das sich aus den Feldern H_1 und H_2 der beiden Ströme in bekannter Weise (nach dem „Parallelogramm der Kräfte") zusammensetzt. Es ist also, wenn die beiden Felder übereinander greifen, im allgemeinen nicht $H^2 = H_1^2 + H_2^2$, also auch nicht W_m gleich der Summe der Werte, die den einzelnen Strömen entsprechen. Es kommt vielmehr ein Glied hinzu, das dem

gleichzeitigen Bestehen der beiden Ströme seine Existenz verdankt. — Berechnen wir es für den Fall der zwei Ringspulen auf gemeinsamem Kern, den wir wieder als dünn voraussetzen. Die Felder sind $H_1 = 4\pi N_1 i_1/l$; $H_2 = 4\pi N_2 i_2/l$. Sie sind gleichgerichtet, also $H = H_1 + H_2$; $H^2 = H_1^2 + H_2^2 + 2H_1 . H_2$. Daraus folgt aber, genau wie bei der Ableitung von (31):

$$W_m = \frac{1}{2} p_1 i_1^2 + \frac{1}{2} p_2 i_2^2 + p_{12} i_1 i_2 \quad . \; . \; 34)$$

wo p_1 und p_2 die beiden Selbstinduktionskoeffizienten, p_{12} den wechselseitigen Induktionskoeffizienten bedeuten (s. (9a), (9b), (9c)). Die Gleichung (34), die hier für eine spezielle Anordnung abgeleitet ist, gilt wiederum ganz allgemein. In die Energiegleichung (32) geht also jetzt der wechselseitige Induktionskoeffizient der beiden Strombahnen ein, und so kommt es, daß sie mit den Stromgleichungen (14) in Uebereinstimmung ist, die ihn jetzt ebenfalls enthalten. Der (übrigens ganz einfache) rechnerische Nachweis soll übergangen werden. — Dagegen wollen wir für den Wechselstromtransformator (dessen Modell wir soeben wieder benutzt haben) den Inhalt der Energiegleichung etwas weiter verfolgen. Wir trennen wieder wie oben in Gedanken die beiden Transformatorspulen von dem Rest ihrer Leitungen — der Speiseleitung bezw. der Nutzleitung — ab, und bezeichnen die Spannungen an den Spulenenden durch $\mathcal{E}_1$ und $\mathcal{E}_2$. Die Leistung, die dem Transformator zugeführt wird, ist dann einerseits $\mathcal{E}_1 i_1$, andererseits $\mathcal{E}_2 i_2$, und die Energiegleichung sagt aus, daß die Summe dieser Leistungen zum Teil als Joulesche Wärme in den Spulen verbraucht wird, zum Teil zur Vermehrung der Energie W_m dient. Aber (vgl. oben die Drosselspule) W_m erhält periodisch immer wieder dieselben Werte, und die Joulesche Wärme ist außerordentlich klein. Im zeitlichen Mittel ist also die gesamte Leistung nahezu Null: was der primären Spule aus der Speiseleitung zugeführt wird, das wird praktisch ungeschmälert von der sekundären Spule an die Nutzleitung abgegeben.

Der Mittelwert der Leistung ($\mathcal{E}$i) hängt nun, wie soeben gezeigt wurde, von den Amplituden der Spannung ($\mathcal{E}$) und der Stromstärke (i) und außerdem von der Phasendifferenz (k) zwischen beiden ab. Wir wollen den speziellen Fall ins Auge fassen, wo der Transformator eine beträchtliche Leistung an eine induktionslose Leitung abgibt; es sollen etwa eine große Anzahl von Glühlampen durch ihn versorgt werden. Dann ist, wie die Theorie lehrt und die Erfahrung bestätigt, sowohl für den primären wie für den sekundären Kreis k sehr klein; dann verhalten sich also die beiden Leistungen einfach wie die Produkte aus Spannungsamplitude und Stromamplitude. Da, wie wir sahen, die Leistungen numerisch gleich sind, so sind also die Produkte gleich. Die ersten Faktoren verhalten sich aber nach Gleichung (23) direkt wie die Windungszahlen; also verhalten sich die Stromstärken umgekehrt wie die Windungszahlen. — Ein Beispiel mag zeigen, was das ökonomisch bedeutet: Die Straßburger Zentrale liefert direkt Wechselstrom von 3000 Volt; dieser wird für die Hausanschlüsse auf 120 Volt herabtransformiert. Nehmen wir einmal an, die soeben entwickelten Beziehungen seien streng erfüllt, dann ist in jedem Transformator der sekundäre Strom 25 mal so stark wie der primäre. Wollte man die gleiche Anzahl von Glühlampen, die jetzt im sekundären Kreis brennt, durch eine direkte Leitung von der Zentrale speisen, so müßte also der Strom in den Speiseleitungen 25 mal stärker sein, als jetzt. Das würde in diesen Leitungen, wenn sie unverändert blieben, einen 625 fachen Energieverlust durch Joulesche Wärme, — oder, wenn dieser Energieverlust nicht gesteigert werden soll, einen 625 fachen Querschnitt der Leitung, d. h. ein 625 faches Kupfergewicht bedingen (vgl. den Artikel „Transformatoren").

3d) Kondensatorentladung. Wenn wir die Energiegleichung (32): $L = J + \delta W_m/\delta t$, wo $L = \mathcal{E}_0 i$, auf die Entladung eines Kondensators (vgl. unter 2f) anwenden wollen, so müssen wir unter $\mathcal{E}_0$ die Spannung zwischen den Drahtenden, also hier zwischen den Kondensatorplatten, verstehen. Diese ist aber P/c, wo P die Ladung, c die Kapazität bedeutet, und zugleich ist $i = -\delta P/\delta t$; also ist $L = -(1/c) . P . \delta P/\delta t = -\delta(P^2/2c)/\delta t$. Nun ist aber

$$W_e = \frac{P^2}{2c} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 35)$$

nichts anderes, als die elektrische Energie des Kondensators (vgl. den Artikel „Elektrische Felder"). Die Gleichung (32) lautet also jetzt: $J . \delta t = -\delta W_e - \delta W_m$. Sie sagt aus, daß Joulesche Wärme entsteht auf Kosten von elektrischer und magnetischer Energie. Zunächst, ehe der Strom begonnen hat, ist ausschließlich die elektrische Energie des geladenen Kondensators vorhanden; indem der Strom anwächst, setzt sie sich in die magnetische Energie des Stromfeldes um, während diese zugleich fortschreitend durch Bildung von Stromwärme verzehrt wird. Jede der drei Energieformen hängt von einer Konstanten des Stromkreises ab: J vom Widerstand w, W_e von der Kapazität c, W_m von dem Induktionskoeffizienten p; die Verhältnisse zwischen diesen Konstanten bestimmen des näheren den Verlauf der Energieumsetzungen. In dem Grenzfall der Gleichung (20) spielt p keine wesentliche Rolle: die

elektrische Energie des Kondensators verwandelt sich im Entladungskreis direkt und gleichmäßig fortschreitend in Wärme. — In dem Fall der oszillierenden Entladung setzt sich periodisch wechselnd die elektrische in magnetische und dann wieder die magnetische in elektrische Energie um, während zugleich die Summe beider dauernd abnimmt, und entsprechend dem Gesamtverlust Wärme entsteht. — In dem Grenzfall der Gleichung (21) endlich spielt w keine Rolle: der Verlust durch Wärme ist unmerklich; ein unveränderlicher Energiebetrag wechselt fortwährend zwischen den Formen der elektrischen und der magnetischen Energie.

3e) Mechanische Analogie. Eine vollkommene mechanische Analogie bietet sich auch hier: Ein Pendel befinde sich in einer reibenden Flüssigkeit. Ist die Flüssigkeit sehr zähe, so geht das emporgehobene und dann losgelassene Pendel in seine Ruhelage zurück und verharrt in dieser. Das Pendel besaß in seiner höchsten Lage eine bestimmte potentielle Energie; diese geht, sobald es losgelassen ist, in kinetische Energie über, die aber ihrerseits sofort durch Reibungswärme aufgezehrt wird. — Ist die Flüssigkeitsreibung gering, so schwingt das Pendel über seine Ruhelage hinaus, kehrt dann um, und kommt erst nach einer Reihe von fortwährend kleiner werdenden Schwingungen schließlich zur Ruhe. Hier ist in den Momenten der Umkehr nur potentielle, in den tiefsten Lagen nur kinetische Energie vorhanden; beide setzen sich periodisch ineinander um, doch nimmt zugleich ihre Summe fortdauernd ab; dem Verlust entspricht ein äquivalenter Betrag an Reibungswärme. Nur wenn die Reibung verschwindend klein ist, behalten die Schwingungen ihre Größe; dann findet ein rein periodischer Austausch zwischen potentieller und kinetischer Energie statt.

3f) Induktion durch Bewegung. Es sei ein einzelner Strom gegeben, etwa in einer Spule fließend; dieser werde ein Eisenstück genähert. Wir haben in der Gleichung (13) $Q = pi$ zu setzen, wo p den Selbstinduktionskoeffizienten bezeichnet. Dieser ändert sich bei der Bewegung des Eisens. Im allgemeinen wird so ein veränderlicher Strom entstehen, so daß also in Q auch der zweite Faktor i sich ändert. Wir wollen aber, um das für uns wesentliche deutlicher hervortreten zu lassen, die Bewegung so reguliert denken, daß der Strom konstant wird. Dazu muß p sich gleichförmig ändern. Dann ist also $\delta Q/\delta t = i.\delta p/\delta t$ und die Stromgleichung wird $iw = \mathcal{E}_0 - i.\delta p/\delta t$. Bilden wir jetzt die Energiegleichung nach (33). Es ist nach (7b) für die Zeiteinheit: $A = \frac{1}{2}i^2.\delta p/\delta t$, und nach (31): $\delta W_m/\delta t = \frac{1}{2}i^2.\delta p/\delta t$, also $\mathcal{E}_0 i = i^2.w + \frac{1}{2}i^2.\delta p/\delta t + \frac{1}{2}i^2.\delta p/\delta t$. Dies ist in Uebereinstimmung mit der Stromgleichung. Man sieht aber: was von der Leistung der Stromquelle nicht für Joulesche Wärme verbraucht wird, das ist nur zur Hälfte als Arbeit bei der Anziehung des Eisens wirksam geworden, zur anderen Hälfte hat es zur Vermehrung der magnetischen Energie gedient. Daß diese Energievermehrung tatsächlich stattgefunden hat, wird klar, wenn wir die Energiezufuhr aus der Stromquelle unterbinden. Der Strom liefert dann, ehe er erlischt, noch Joulesche Wärme; diese entspricht dem Vorrat an magnetischer Energie; sie ist um so größer, je größer p ist; sie ist größer, wenn das Eisen sich in der Spule befindet, als wenn es entfernt ist.

Ganz ebenso verhält es sich, wenn zwei Stromkreise gegeneinander bewegt werden. Denken wir etwa an zwei parallele und gleichsinnige Ströme. Sie ziehen sich an; nähern sie sich, so wird also positive Arbeit geleistet (die etwa zum Heben von Gewichten dienen kann). Diese wird nun nicht etwa der magnetischen Energie des Systems entnommen. Vielmehr steigt die Energie (genauer: der Anteil, der dem gleichzeitigen Bestehen der beiden Ströme entspricht) um den Betrag der Arbeit, — und beide Beträge (also das doppelte der geleisteten Arbeit) liefern die Stromquellen neben der Jouleschen Wärme.

Dies alles ist in voller Uebereinstimmung mit dem Induktionsgesetz. So bleibt am Ende nur das auffällig, was zunächst als das einfachste erschien: die Form, die die Energiegleichung bei der Annäherung eines permanenten Magneten an einen Stromleiter annimmt. Wir sehen jetzt (vgl. (29) mit (33)): sie kann nur richtig sein, wenn die magnetische Energie sich bei dieser Annäherung nicht ändert, — mit anderen Worten, wenn die magnetische Energie eines Systems, das aus einem Strom und einem permanenten Magneten besteht, stets einfach die Summe der beiden Energiewerte ist, die dem Strom und dem Magneten einzeln zukommen. Das ist nun tatsächlich so. Der theoretische Beweis kann freilich elementar nicht geführt werden; der experimentelle Beweis aber liegt in folgendem: Der Schließungs- und Oeffnungsstrom einer Spule, der durch Ausfüllung der Spule mit weichem Eisen sehr wesentlich verändert wird (s. unter 2b und oben), wird durch die Ausfüllung mit einem permanenten Magneten — sofern man in ihm vollständige Sättigung voraussetzen darf — nicht verändert.

Literatur. *Weitere Ausführungen in den Lehrbüchern der Elektrizität, etwa: a)* ***G. Mie****, Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus. 1910. — b)* ***H. Starke****, Experimentelle Elektrizitätslehre. 2. Aufl. 1910. — c)* ***G. Ferraris****, Die wissenschaftlichen Grundlagen der Elektrotechnik.*

*1901. — d) **E. Cohn**, Das elektromagnetische Feld. 1900. a) ohne Rechnung, b) und c) mit Verwendung der Elemente der Differentialrechnung, d) in mathematischer Behandlung. — Vollständige Literaturangaben im Handbuch der Physik, herausgegeben von **Winkelmann**, Bd. 5, 2. Aufl. 1908.*

E. Cohn.

Magnetische Eigenschaften der Stoffe.

1. Allgemeines und Definitionen. 2. Magnetisierungskurven. 3. Eisensorten. 4. Reines Eisen. 5. Walzeisen, Schmiedeeisen, Stahlguß. 6. Gußeisen. 7. Stahl. 8. Eisen-Silicium-Legierungen. 9. Eisen-Aluminium-Legierungen. 10. Eisen-Antimon-Legierungen. 11. Eisen-Mangan-Legierungen. 12. Nickelstahl. 13. Magnetit, Pyrrhotin, Hämatit. 14. Nickel, Kobalt, Mangan. 15. Heuslersche Legierungen. 16. Einfluß der Temperatur. 17. Paramagnetische und diamagnetische Substanzen.

1. Allgemeines und Definitionen. Die alte Methode zur Entscheidung der Frage, ob ein Körper magnetisch ist oder nicht, gilt im allgemeinen auch heute noch: Wird er von einem kräftigen Magnet merklich angezogen, so kann er als ferromagnetisch betrachtet werden. Aber auch die anderen Körper sind nicht durchaus unempfindlich gegen die Einwirkung des Magnets, nur muß man sie zum Nachweise davon in gestreckter Gestalt leicht drehbar zwischen den Polen eines starken Elektromagnets aufhängen; werden sie dann angezogen, d. h. stellen sie sich mit ihrer Längsrichtung in die Richtung der Magnetpole, so nennt man sie paramagnetisch, werden sie abgestoßen, d. h. stellen sie sich mit ihrer Längsrichtung quer zur Verbindungslinie der Pole, so bezeichnet man sie als diamagnetisch. Wir beschäftigen uns zunächst mit der praktisch weitaus wichtigsten Gruppe, den ferromagnetischen Körpern; als solche sind zu nennen in erster Linie das Eisen mit einer ganzen Anzahl seiner Legierungen, dann Kobalt, Nickel, Mangan und die sogenannten Heuslerschen Legierungen.

Zum Zweck der dauernden Magnetisierung bringt man gestreckte Körper, wie Drähte, Stäbe, Ellipsoide u. dgl. am besten in stromdurchflossene Spulen und entfernt sie dann daraus oder unterbricht den Strom; Hufeisenmagnete u. dgl. legt man mit den Schenkeln an die Pole eines Elektromagnets oder eines starken anderen Hufeisenmagnets.

Wird eine langgestreckte Spule von n Windungen pro cm von einem Strom von i Ampere durchflossen, so bezeichnet man den Ausdruck $\mathfrak{H}=0{,}4.\pi ni$ als ihre „Feldstärke", und nimmt an, daß in der Mitte der Spule pro qcm $\mathfrak{H}$ „Kraftlinien" (Einheit das „Gauß") die Spule durchsetzen. In einem in das Feld gebrachten ferromagnetischen Körper wird nun die meist sehr viel höhere Anzahl $\mathfrak{B}$ von „Induktionslinien" pro qcm (Einheit das „Maxwell") erzeugt, die sich, mit Hilfe einer sogenannten Sekundärspule und des ballistischen Galvanometers leicht messen läßt vgl. den Artikel „Magnetische Messungen"). Das Verhältnis $\mathfrak{B}/\mathfrak{H}=\mu$ bezeichnet man als „Permeabilität" oder „magnetische Durchlässigkeit". Mit dem früher ausschließlich gebrauchten Begriff des „magnetischen Moments" steht $\mathfrak{B}$ in der Beziehung $\mathfrak{B}=(4\pi\mathfrak{J}+\mathfrak{H})$, wobei $\mathfrak{J}$ das magnetische Moment eines ccm der betreffenden Substanz bezeichnet, während für die Beziehung zwischen der Permeabilität μ und der Suszeptibilität $\varkappa=\mathfrak{J}/\mathfrak{H}$ gilt: $\mu=4\pi\varkappa+1$. Daraus folgt natürlich umgekehrt: $\mathfrak{J}=\frac{\mathfrak{B}-\mathfrak{H}}{4\pi}$; $\varkappa=\frac{\mu-1}{4\pi}$.

2. Magnetisierungskurven. Die Permeabilität μ ist nun nicht nur abhängig von der Beschaffenheit des Probematerials, sondern auch von der Höhe der jeweiligen Feldstärke, und es ist die Aufgabe der magnetischen Messung, diese Beziehung zwischen $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ bei der zu untersuchenden Probe für das ganze Bereich der in Betracht kommenden Feldstärken zu ermitteln. Man trägt diese Beziehung meist in Form einer Magnetisierungskurve graphisch auf, und zwar die Feldstärken als Abszissen, die zugehörigen Induktionen als Ordinaten (Fig. 1[1])). Bei einer derartigen Magnetisierungskurve, wie sie erhalten wird wenn man vom unmagnetischen zum magnetisierten Zustand übergeht („Nullkurve", O A), lassen sich im allgemeinen drei mehr oder weniger deutliche Teile unterscheiden: 1. In dem untersten Teil verläuft die Kurve ein kleines Stück nahezu geradlinig, d. h. in diesem Bereich

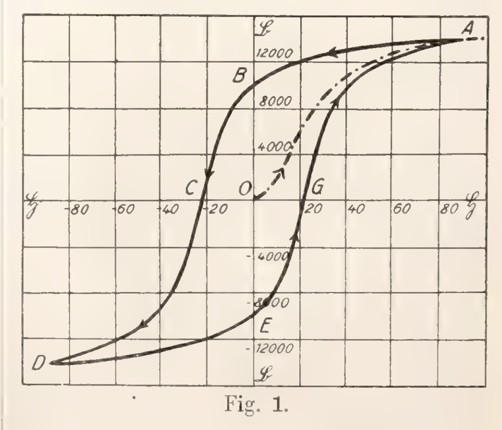


Fig. 1.

der sogenannten „Anfangspermeabilität" nimmt die Induktion nahezu proportional

[1]) Fig. 1, 2 und 3 sind dem Hilfsbuch für Elektrotechnik von Strecker entnommen.

der Feldstärke zu; sodann macht die Kurve eine mehr oder weniger scharfe Biegung und steigt sehr viel steiler an. Diese Biegung liegt bei magnetisch weichem Material (Schmiedeeisen, Flußeisen usw.) bei einer Feldstärke von wenigen Zehntel Gauß und ist ziemlich scharf ausgeprägt, bei hartem Material (gehärtetem Stahl und Gußeisen) beträchtlich höher und ist hier sanft abgerundet. Der zweite Teil der Kurve oberhalb dieser Biegung weist die größten individuellen Verschiedenheiten auf; er enthält das Bereich der „maximalen Permeabilität", die nach den bisherigen Messungen etwa vom Werte 100 beim harten Stahl bis zu dem enormen Betrag von 14000 beim ganz weichen Eisen ansteigen kann. Durch zahlreiche Versuche (Gumlich und Schmidt) ist festgestellt worden, daß diese maximale Permeabilität etwa zwischen den Induktionen $\mathfrak{B}=5000$ und 7000 liegt, und zwar bei einer Feldstärke, welche etwa dem 1,4-fachen der sogenannten „Koerzitivkraft" entspricht, auf die wir demnächst näher zu sprechen kommen. Jenseits des sogenannten „Knies", das bei weichem Eisen bei einer Feldstärke von etwa $\mathfrak{H}=3$ bis 5 liegt, bei hartem aber viel höher, und das mehr oder weniger abgerundet zu sein pflegt, beginnt der dritte, nur noch schwach ansteigende Teil der Magnetisierungskurve, der anfangs noch stärker gekrümmt erscheint, mit zunehmender Feldstärke immer geradliniger verläuft und zwischen $\mathfrak{H}=2000$ und etwa 6000 in eine vollständige Gerade übergeht; damit ist die sogenannte „Sättigung" des Materials erreicht. Hat man den konstanten „Sättigungswert" $4\pi J_{Max}$ einmal bestimmt, so ergibt sich hieraus nach der Beziehung $\mathfrak{B}=4\pi\mathfrak{J}+\mathfrak{H}$ für jede beliebig hohe Feldstärke die zugehörige Induktion und Permeabilität.

In Figur 2 sind die Beziehungen zwischen Permeabilität und Induktion für einige Eisensorten aufgetragen, und zwar für Stahlguß verschiedener Güte (1 bis 7), geglühtes Gußeisen (8) und ungeglühtes Gußeisen (9).

Hat man in der beschriebenen Weise die Feldstärke bis zu einer gewissen Höhe wachsen lassen (in Figur 1 bis $\mathfrak{H}=80$) und läßt sie nun wieder abnehmen, so nimmt auch die Induktion ab, aber nicht in demselben Maße, wie sie zugenommen hatte; ihre Abnahme bleibt also hinter derjenigen der Feldstärke zurück, und man hat deshalb diese Erscheinung als Hysterese (ὑστερέω, zurückbleiben)

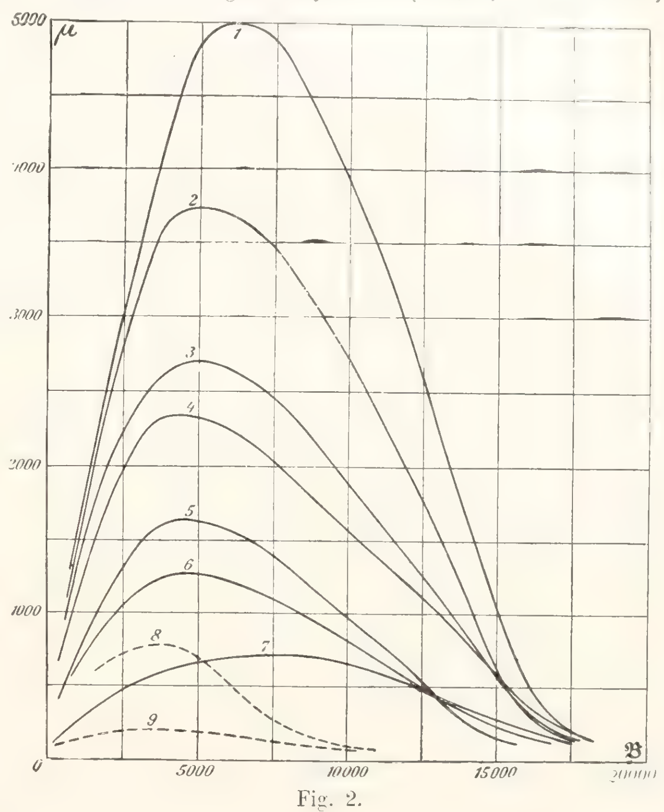


Fig. 2.

bezeichnet. Bei der graphischen Darstellung durchwandert also der Punkt nicht wieder die sogenannte Nullkurve OA (Fig. 1) rückwärts, sondern er verfolgt den sogenannten „absteigenden Ast" ABC. Ist die Feldstärke Null geworden, so ist gleichwohl ein mitunter sehr beträchtlicher Bruchteil der Magnetisierung zurückgeblieben, die sogenannte Remanenz OB, die erst zum Verschwinden gebracht werden kann, wenn die Richtung des Magnetisierungsstroms umgekehrt wird. Diejenige Feldstärke OC, welche gerade hinreicht, um die Remanenz zu beseitigen, heißt „Koerzitivkraft". Läßt man dann die negative Feldstärke weiter ansteigen bis zur vorigen Höhe (Punkt D), wieder auf Null abnehmen (Punkt E) und kehrt die Richtung nochmals um, so durchläuft unser darstellender Punkt den aufsteigenden Ast CD, den absteigenden Ast DG und wieder den aufsteigenden Ast GA, er beschreibt also eine vollständige, aus symmetrischen Hälften bestehende Schleife, die

„Hystereseschleife". Ihr Flächeninhalt ist, wie Warburg und Ewing unabhängig voneinander gefunden haben, proportional der zur Ummagnetisierung unseres Eisenkörpers erforderlichen Energie, und zwar wird dieser sogenannte „Hystereseverlust" E pro ccm Eisen, ausgedrückt in Erg, gegeben durch $E = \frac{1}{4\pi}\int \mathfrak{B}.d\mathfrak{H}$, wobei das Integral über den ganzen Zyklus zu erstrecken ist.

In der Elektrotechnik benutzt man zur Charakterisierung des Hystereseverlusts gewöhnlich die von Steinmetz eingeführte Beziehung $E=\eta.\mathfrak{B}^{1,6}$ ausgedrückt in Watt. Steinmetz hatte nämlich ursprünglich irrtümlicherweise angenommen, daß η eine Konstante sei, so daß es genügen würde, diese Konstante für irgendeine Induktion experimentell zu bestimmen, um mit Hilfe dieser Beziehung für jede beliebige andere Induktion den zugehörigen Hystereseverlust berechnen zu können. Tatsächlich ist das nur der Fall für Werte von $\mathfrak{B}$, die sich nicht beträchtlich unterscheiden, und es können somit in engen Grenzen die Werte von η wohl zur Charakterisierung von magnetischen Materialien verwendet werden, dagegen gilt dies nicht mehr, wenn es sich bei einem Vergleich um sehr verschieden hohe Induktionen handelt.

Der Name „Hystereseverlust" ist eigentlich nicht ganz glücklich gewählt, denn tatsächlich findet dabei nicht ein Verlust an Energie statt, sondern eine Umwandlung in Wärme, eine Energieform, die namentlich beim Betrieb von Dynamomaschinen und Transformatoren in verschiedener Beziehung äußerst störend wirkt, so daß der Konstrukteur stets darauf bedacht sein muß, nötigenfalls durch besondere Vorsichtsmaßregeln, Vergrößerung der Oberfläche, Kühlvorrichtungen usw. den entstehenden Wärmeüberschuß zu beseitigen. Der auf diese Weise auftretende Verlust an Energie, vermehrt um den sogenannten Wirbelstromverlust, von dem später die Rede sein wird, beträgt allein für Deutschland jährlich Millionen von Mark, und es war deshalb das Bestreben der Technik stets darauf gerichtet, Material zu finden, bei dem dieser Verlust möglichst klein wird.

Wie Figur 1 zeigt, wird bei gleich hoher Magnetisierung der Flächeninhalt der Hystereseschleife um so größer, je breiter sie ist. Somit läßt sich unter sonst gleichen Verhältnissen vielfach schon die sehr einfach zu bestimmende Koerzitivkraft als angenähertes Maß für den Hystereseverlust betrachten. Andererseits aber hängt der Flächeninhalt auch von der sonstigen Gestalt der Schleife ab, die vollkommen individueller Natur ist und sich bis jetzt durch keine Formel aus den sonstigen magnetischen Eigenschaften hat darstellen lassen. Erfahrungsgemäß gilt die Beziehung, daß unter sonst gleichen Verhältnissen die höhere Remanenz auch den höheren Hystereseverlust bedingt. Ebenso muß, da die Nullkurve immer innerhalb der Hystereseschleife verläuft, bei schmalen und steil ansteigenden Schleifen die Beziehung zwischen $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$, also die Permeabilität μ, größer werden, als bei niedrigen und stark abgerundeten Schleifen. Für die Maximalpermeabilität μ_{Max} gilt die angenäherte, empirische Beziehung $\mu_{Max} = \frac{R}{2C}$ wobei R die Remanenz, C die Koerzitivkraft bezeichnet (Gumlich und Schmidt).

3. Eisensorten. Der Begriff „Eisen" ist außerordentlich dehnbar, denn es hat in magnetischer wie in mechanischer Beziehung je nach dem Grad der Reinheit und der Art der thermischen und mechanischen Behandlung sehr verschiedene Eigenschaften. Reines Eisen findet sich in der Technik so gut wie nie, denn auch das reinste Schmiede- oder Walzeisen enthält immer noch kleine Beimengungen von Kohlenstoff, Mangan, Silicium, Phosphor, Schwefel, Kupfer usw., sowie hauptsächlich von Schlacken, Verunreinigungen, die freilich bei guten Sorten insgesamt 0,1 bis 0,2% nicht übersteigen. Derartiges Schmiedeeisen, das nicht nur mechanisch zäh und schmiegsam ist, sondern auch in magnetischer Beziehung früher von keinem Material übertroffen wurde, ist infolge der schwierigen Herstellungsart recht kostspielig. Dazu kommt die Schwierigkeit der Bearbeitung durch das Schmieden und die dabei fast unvermeidliche Ungleichmäßigkeit im Gefüge, die z. T. auf die bisweilen nur mikroskopisch kleinen Einschlüsse von Schlacken, Graphit und dergleichen zurückzuführen ist und sich am leichtesten durch die Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit an den verschiedenen Stellen eines zylindrischen Probestabs ermitteln läßt (Ebeling). Es war deshalb ein beträchtlicher Fortschritt, als es gelang, mittels der Bessemer-Birne, des Thomas- und des Siemens-Martin-Ofens schmiedbaren Guß herzustellen, welcher nahezu dieselbe Reinheit besitzt, als das Schmiedeeisen, aber eine viel größere Gleichmäßigkeit, und der direkt in die gewünschte Form gegossen werden kann. Namentlich der Siemens-Martin-Ofen liefert heutzutage große Mengen des für den Bau von Dynamomaschinen, Transformatoren usw. notwendigen Grundmaterials, und zwar in zunehmender Güte, da die auf vollkommen wissenschaftlicher Grundlage beruhende Eisenindustrie es immer mehr verstanden hat, den wachsenden Anforderungen der Elektrotechnik an die magnetischen Eigenschaften des Materials nachzukommen.

Im allgemeinen enthält ein derartiges Material, das zum großen Teil zu 0,3 bis 0,5 mm dicken Blechen (Dynamoblechen und Transformatorenblechen) ausgewalzt wird, nur wenige Hundertstel Prozent von Kohlenstoff, Silizium, Phosphor, Schwefel usw., dagegen meist zur Erzielung eines blasenfreien Gusses 0,2 bis 0,4 % Mangan.

Dieser schmiedbare Guß wird zumeist als „Flußeisen" oder häufiger noch als „Stahlguß" bezeichnet, ein insofern unglücklich gewählter Name, als er leicht zu Verwechselungen mit dem sogenannten „Gußstahl" Veranlassung gibt, der ganz andere magnetische und mechanische Eigenschaften besitzt. Hervorgerufen wurde der Name Stahlguß durch das Bestreben der Eisenhütten, durch die Bezeichnung „Stahl" die besonders feine Qualität des Materials anzudeuten, im Gegensatz zu dem gewöhnlichsten Gußmaterial, dem Gußeisen, mit seinen in jeder Beziehung minderwertigen Eigenschaften.

In früherer Zeit war die Bezeichnung „Stahl" reserviert für eine Legierung von Eisen mit 0,5 % bis von 1,5 % Kohlenstoff, dem je nach Bedarf noch andere Zusätze zur Veränderung seiner mechanischen, elektrischen und magnetischen Eigenschaften beigefügt wurden. Er läßt sich gießen, schmieden aber außerdem durch Eintauchen in kaltes Wasser oder Oel härten, und gerade durch das letztere Verfahren werden, wie wir sehen werden, die magnetischen Eigenschaften außerordentlich stark beeinflußt.

Zwischenlegierungen mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,1 % bis 0,5 % kommen im technischen Betrieb wohl nur vereinzelt zu speziellen Zwecken vor, wenn beispielsweise neben relativ hoher Magnetisierbarkeit eine beträchtliche mechanische Festigkeit verlangt wird.

Das gewöhnlichste und magnetisch minderwertigste Material, das aber gleichwohl seiner Billigkeit und Leichtflüssigkeit halber noch vielfach zu größeren Gußstücken, wie Magnetgestellen von Dynamomaschinen usw. verwendet wird, ist das Gußeisen, das bekanntlich bis zu 4% Kohlenstoff und mehrere Prozent Mangan, Silicium usw. als Verunreinigungen enthält und nicht mehr schmiedbar ist.

Wir wollen nun die magnetischen Eigenschaften dieser verschiedenen Eisensorten der Reihe nach kurz besprechen.

4. Reines Eisen. Die Herstellung von reinem Eisen ohne alle Verunreinigungen ist außerordentlich schwierig, seine magnetischen Eigenschaften sind deshalb auch noch nicht sicher festgestellt, man ist vielmehr noch auf Vermutungen angewiesen; es spielen nämlich unzweifelhaft nicht nur Beimengungen fester, sondern auch gasförmiger Substanzen eine beträchtliche Rolle, die, wie unter anderen Boudouard und Belloc festgestellt haben, in beträchtlichen Mengen im Eisen enthalten sind, aber nach dem heutigen Stand der Wissenschaft nicht mit Sicherheit vollständig entfernt werden können. Hierzu kommt noch, daß die magnetischen Eigenschaften auch in hohem Maße von der molekularen Struktur abhängen, die durch die thermische Behandlung stark beeinflußt wird. Es ist deshalb auch keineswegs einerlei, auf welchem Wege das reine Eisen hergestellt wurde, und man wird je nach der Herstellungsart wenigstens im untern Teil der Magnetisierungskurve stets beträchtliche Abweichungen zu erwarten haben, während der Sättigungswert davon nicht wesentlich abzuhängen scheint; hierfür wird man den in der Physikalisch-technischen Reichsanstalt gefundenen und auch durch anderweitige Messungen bestätigten Wert $4\pi\mathfrak{J}_{Max} = 21600$ als etwa innerhalb eines halben Prozents richtig ansehen dürfen.

Mehrfache Versuche, aus käuflichem, von erstklassigen chemischen Fabriken bezogenem pulverförmigem Eisen, das kaum nachweisbare Spuren fester Verunreinigungen enthielt, durch Schmelzen in verschiedenen Gasatmosphären, durch nachträgliches Schmieden usw. magnetisch vorzügliches Material in Stab- oder Drahtform zu gewinnen, sind sämtlich mißglückt, denn die magnetischen Eigenschaften ergaben sich als geringwertiger wie bei gutem Stahlguß. Dasselbe Ergebnis hatten die außerordentlich sorgfältigen Versuche von H. Kreusler, der, von reinstem Ammonium-Eisensulfat ausgehend, durch systematisches Reinigen auch die kleinen noch vorhandenen festen Verunreinigungen bis auf wenige Tausendstel Prozent beseitigte. Das noch stark wasserstoffhaltige Material wurde dann im Vakuum durch den Lichtbogen geschmolzen, die abtropfenden Kügelchen auf Quecksilber aufgefangen und zu Draht ausgezogen; der Draht wurde in eine Glühbirne eingeschmolzen und durch den elektrischen Strom auf Gelbglut erhitzt, so daß mit Sicherheit anzunehmen ist, daß wenigstens der Wasserstoffgehalt beseitigt worden ist. Gleichwohl ergab die magnetische Untersuchung dieser feinen Drähtchen in der Reichsanstalt ein unerwartet schlechtes Resultat. In der nachstehenden kleinen Tabelle 1 sind einige der hierbei gefundenen Daten zusammengestellt mit den entsprechenden Daten eines ausnehmend guten käuflichen Materials, das nach einer vor dem Ausglühen ausgeführten chemischen Analyse neben 0,4% Mangan noch etwa 0,2% anderer Verunreinigungen enthielt, aber durch geeignete thermische Behandlung (Ausglühen im Vakuum usw.)

die besten bis damals bekannten magnetischen Eigenschaften angenommen hatte.

Tabelle 1.

	Eisen von Kreusler	bester Stahlguß
μ_{Max}	2 300	14 000
$\mathfrak{B}$ für $\mathfrak{H} = 138$ . .	71 400	18 900
Koerzitivkraft . .	2,6	0,37
Remanenz	12 250	11 050
Hystereseverlust .	20 100	3 760

Worauf dies ungünstige Ergebnis beim Kreuslerschen Eisen zurückzuführen ist, hat sich mit Sicherheit nicht feststellen lassen. Möglicherweise spielt ein unbekannter Gehalt an Eisenoxyd, dessen quantitative Bestimmung zurzeit noch sehr unsicher ist, oder auch eine molekulare Verschlechterung durch das starke Ausglühen eine Rolle.

Der zweite Weg zur Herstellung reinen Eisens, der schon seit langer Zeit auch zur Erzielung magnetisch hervorragenden Materials beschritten wurde, aber fast ausnahmslos ohne Erfolg, ist die Elektrolyse. Diese ergab ein zwar an festen Verunreinigungen armes, gleichwohl aber hartes, sprödes und brüchiges Material, das in magnetischer Beziehung einen stahlähnlichen Charakter trug, namentlich aber eine unverhältnismäßig große Koerzitivkraft (20 und mehr) besaß. Zwar konnte durch geeignetes Ausglühen eine beträchtliche Verbesserung erzielt werden, doch blieben stets die Resultate weit hinter den Erwartungen zurück. Zur Erklärung wurde entweder die molekulare Struktur herangezogen, oder ein unzweifelhaft vorhandener hoher Wasserstoffgehalt.

Daß die molekulare Struktur bei elektrolytisch niedergeschlagenem Eisen eine Rolle spielen kann, läßt sich aus der Tatsache schließen, die schon vor vielen Jahren Beetz und später Maurain gefunden hatten und die neuerdings wieder von Kaufmann bestätigt wurde, daß nämlich das in einem Felde von geringer Stärke frisch niedergeschlagene Eisen ohne besondere weitere Magnetisierung eine so hohe Remanenz besitzt, daß sie durch nachträgliche Magnetisierung mit viel höheren Feldern kaum mehr gesteigert werden kann. Das schwache magnetische Feld muß also, wenn man der gewöhnlichen Anschauung über das Wesen der Magnetisierung folgen will, auf die im Entstehen begriffenen Molekularmagnetchen eine starke, richtende Wirkung ausgeübt haben, und es würde keineswegs ausgeschlossen erscheinen, daß hierdurch auch die magnetischen Eigenschaften des Materials eine dauernde Aenderung erfahren könnten. Nun hat die vor kurzem durchgeführte Nachprüfung dieser Versuche durch W. Kaufmann und W. Meier ergeben, daß allerdings die magnetischen Eigenschaften des frisch niedergeschlagenen Elektrolyteisens ganz eigentümlich sind. Der aufsteigende Ast der Hystereseschleife steigt fast senkrecht in die Höhe, bildet ein außerordentlich scharfes Knie und steigt bei hoher Feldstärke nur noch wenig an, so daß die recht breite Hystereseschleife mit ihrer auch hier hohen Koerzitivkraft eine nahezu rechteckige Gestalt besitzt. Dies ist aber nach den erwähnten Versuchen nicht auf die molekulare Beschaffenheit, sondern auf die Wirkung des im Eisen vorhandenen Wasserstoffs zurückzuführen, denn nicht nur ging schon bei bloßem Lagern des in sehr dünnen Schichten niedergeschlagegenen Eisens offenbar infolge von Wasserstoffabgabe die eigentümliche Form der Hystereseschleife durch Abrundung der Ecken usw. immer mehr in die gewöhnliche über, sondern man konnte dann durch nachträgliche kathodische Polarisation die ursprüngliche eckige Form der Schleife wieder hervorrufen.

Einen wesentlichen Fortschritt erzielte Franz Fischer durch ein besonderes elektrolytisches Verfahren, dessen Einzelheiten nicht bekannt sind. Das Material erwies sich zwar im ungeglühten Zustande ebenfalls noch als magnetisch ziemlich hart, ließ sich aber durch mehrfaches Glühen im Vakuum außerordentlich verbessern, und zwar erzielte der Verfasser bei Versuchen in der Reichsanstalt mit einem derartig hergestellten Streifen die bis jetzt unerreicht geringe Koerzitivkraft von nur $0{,}2_3$, eine Maximalpermeabilität von etwa 14000 und einen entsprechend geringen Hystereseverlust, und wenn das auch vorläufig ein Ausnahmefall geblieben ist — andere ebenso behandelte Proben ergaben eine Koerzitivkraft von 0,4 bis 0,6 — so legt doch dies Ergebnis in Verbindung mit ähnlichen Erfahrungen die Vermutung nahe, daß reines, gasfreies und thermisch richtig behandeltes Eisen Hysterese überhaupt nicht besitzt.

5. Walzeisen, Schmiedeeisen, Stahlguß. Von dem eben erwähnten idealen Zustande ist man allerdings beim heutigen technischen Material noch ziemlich weit entfernt, wie die Zusammenstellung in Tabelle 2 zeigt, aber es ist doch im Verlauf der letzten Jahre auch bei diesem ein großer Fortschritt erzielt worden, denn noch vor 10 Jahren galt ein Material mit einer Koerzitivkraft von etwa 1,5 als recht gut, heute verlangt man bereits die Hälfte und kommt unter Umständen noch weiter. Die Werte innerhalb der verschiedenen Eisensorten bei Tabelle 2 sind nach zunehmender Koerzitivkraft geordnet; man erkennt, daß bei Nr. 3 bis 12 ungefähr in derselben Reihenfolge

Tab. 2. Magnetisierbarkeit verschiedener Eisensorten
Nach Beobachtungen in der Reichsanstalt.

Material	Lfde. Nr.	$\mathfrak{H}_{Max}$	$\mathfrak{B}_{Max}$	$\mathfrak{B}$ für $\mathfrak{H} = 100$	Remanenz	Koerz. Kraft	μ_{Max}	Energievergeudung (Erg)	$\mu =$	Widerstand für m mm² (Ohm)
Walzeisen	1	129	18 190	17 700	10 300	$0{,}6_0$	8350	4 900	0,00075	0,113
Schmiedeeisen	2	145	18 370	17 650	9 000	$1{,}6_5$	2850	12 300	185	0,148
gegossenes Material (Stahlguß, Flußeisen, Dynamostahl)	3	129	17 950	17 470	8 000	$0{,}8_0$	5240	10 100	15[illegible]	0,143
	4	129	17 700	17 200	7 500	$0{,}9_5$	4070	9 400	150	0,154
	5	128	18 040	17 570	7 200	$1{,}0_4$	3200	10 700	166	0,142
	6	128	18 080	17 600	7 500	$1{,}3_5$	2610	11 400	170	0,167
	7	145	18 250	17 500	10 200	$1{,}5_0$	3380	13 600	207	0,148
	8	127	18 190	17 700	9 200	$1{,}8_2$	2460	14 700	225	0,154
	9	129	18 190	17 670	7 500	$2{,}0_0$	1900	15 700	240	0,129
	10	129	17 940	17 400	11 700	$2{,}4_2$	2250	20 300	317	0,158
	11	128	17 790	17 300	11 080	$3{,}2_7$	1620	24 200	383	0,217
	12	129	17 270	16 750	9 550	$4{,}3_3$	1100	30 200	502	0,196
Dynamoblech (geglüht)	13	129	17 430	16 900	9 800	$1{,}1_5$	4950	9 400	154	—
	14	128	19 540	19 100	7 550	$1{,}3_7$	2940	10 700	146	—
	15	146	18 490	17 700	8 300	$1{,}6_2$	2660	11 200	167	0,144
	16	146	18 500	17 730	8 800	$2{,}3_9$	1840	16 200	241	0,144
	17	129	17 440	17 000	10 000	$2{,}9_0$	1740	17 600	288	—
	18	127	18 320	17 800	10 150	$3{,}3_8$	1410	22 000	332	—
	19	124	18 880	18 450	11 550	$4{,}1_8$	1220	28 800	415	—
Dynamoblech legiert, schwach	20	150	18 220	17 430	9 400	$1{,}3_0$	3300	12 600	192	—
Dynamoblech legiert, stark	21	150	17 550	16 740	9 850	$0{,}7_7$	6200	8 090	131	—
Gußeisen, ungeglüht	22	155	10 320	9 030	4 630	11,3	200	34 600	1310	0,878
Gußeisen, dass. geglüht	23	155	10 930	9 900	5 560	$4{,}0_6$	800	14 900	515	0,798
Gußeisen, ungeglüht	24	154	10 030	8 800	4 630	13,2	200	36 000	1450	0,989
Gußeisen, dass. geglüht	25	155	10 640	9 600	5 060	$4{,}6_8$	560	16 100	580	—
Stahl, gehärtet	26	234	16 220	13 900	11 700	52,6	195	—	—	0,325
	27	235	15 120	12 200	10 500	61,7	125	—	—	0,360
	28	238	13 370	9 500	8 880	69,7	—	—	—	0,422

die Induktion $\mathfrak{B}$ für $\mathfrak{H} = 100$ abnimmt, der hier nicht bestimmte Sättigungswert wird also ebenfalls sinken, das gleiche ist der Fall bei der Maximalpermeabilität, während umgekehrt der Hystereseverlust (η) zunimmt und ebenso der elektrische Widerstand. Diese Erscheinungen sind, wie später zu besprechende Versuche gezeigt haben, wohl sämtlich auf den mit wachsender Koerzitivkraft zunehmenden Gehalt an Verunreinigungen, besonders durch Kohlenstoff, zurückzuführen. Für die Remanenz dagegen läßt sich keinerlei Regel aufstellen; ihre Beziehungen zu den übrigen magnetischen und elektrischen Eigenschaften ist noch völlig dunkel; dasselbe gilt für die Anfangspermeabilität μ_0, die beim Stahlguß je nach Qualität von etwa 200 bis 500 variiert.

Ein ähnliches Verhalten zeigen auch die aus dem Stahlguß durch Auswalzen hergestellten Dynamobleche (Tab. 2 Nr. 13 bis 19). Diese erfahren zunächst durch den Walzprozeß eine starke mechanische Härtung, sie „federn", wie es ja bekanntlich auch gelingt, andere weiche Materialien, z. B. Kupfer, Messing usw. durch Hämmern, Pressen usw. zu härten, und auch magnetisch zeigen sie so schlechte Eigenschaften (Koerzitivkraft 3 bis 6), daß sie in diesem Zustand nicht verwendet werden könnten. Sie verlieren jedoch diese Härte durch mehrstündiges Ausglühen zwischen 750° und 900°, wobei man gleichzeitig auch sonst noch eine magnetische Verbesserung zu erzielen pflegt, so daß das geglühte Blech schließlich vielfach besser ist, als das Ausgangsmaterial vor dem Walzen. Immerhin kann auch mehrfaches Glühen nicht alle Spuren des Walzprozesses verwischen, denn man findet nunmehr, namentlich bei dünnen Blechen, eine deutliche Abhängigkeit der Magnetisierbarkeit von der Walzrichtung: Am kleinsten ist dieselbe senkrecht zur Walzrichtung, am größten entweder in der Walzrichtung oder unter einem Winkel von 45° dagegen, und zwar können die Differenzen oft sehr beträchtlich werden; bei der Konstruktion von Transformatoren und bei der Prüfung von magnetischem Material ist auf diesen Umstand, der erst neuerdings erkannt und gewürdigt wurde, wohl zu achten.

Eine eigentümliche Erscheinung, welche

manche Dynamobleche zeigen, ist das sogenannte „Altern". Man bezeichnet damit (im Gegensatz zu dem später zu erwähnenden „Altern" der Heuslerschen Legierungen) die Erscheinung, daß die magnetischen Eigenschaften desselben Materials sich beim dauernden Gebrauch in Transformatoren verschlechtern, so daß der Wirkungsgrad der Transformatoren sinkt und die Hystereseverluste steigen. Diese außerordentlich unwillkommene Erscheinung ist, wie Versuche gezeigt haben, eine Folge nicht der fortwährenden Ummagnetisierung, sondern der damit verbundenen mäßigen Erwärmung; im übrigen ist sie noch völlig unaufgeklärt, dürfte aber wohl ebenfalls auf molekulare Vorgänge zurückzuführen sein. Rein magnetisch macht sie sich dadurch geltend, daß die ursprünglich schmale und steilaufsteigende Hysteresekurve sich verbreitert, abrundet und abflacht, so daß auch die Permeabilität entsprechend sinkt; so hatte sich bei der Untersuchung eines besonders ungünstigen Materials in der Reichsanstalt ergeben, daß durch 600-stündige Erwärmung auf 100° die Koerzitivkraft und dementsprechend auch der Hystereseverlust auf das 2,5 fache gestiegen war.

6. Gußeisen. Gegenüber dem besonders reinen und magnetisch weichen Stahlguß steht als magnetisch schlecht das Gußeisen, das, wie schon oben erwähnt, bis zu 10 Gewichtsprozent Verunreinigungen enthalten kann. Diese Tatsache genügt schon zur Erklärung dafür, daß der Sättigungswert des Gußeisens sehr viel geringer ist, als der des reinen Eisens, denn es kommt ja hinzu, daß das spezifische Gewicht der Verunreinigungen durchschnittlich nur etwa den dritten Teil von demjenigen des reinen Eisens beträgt, so daß bei etwa 10 Gewichtsprozent Verunreinigungen etwa 30% des wirksamen Eisenquerschnitts durch unmagnetische Substanzen oder schwach magnetisierbare Legierungen fortgenommen werden. Dazu kommt allerdings noch der verschlechternde Einfluß des bis zu 4% betragenden Kohlenstoffgehalts, von dem später beim Stahl ausführlich die Rede sein wird. Eine Uebersicht über die Magnetisierungswerte geben die Nr. 22 bis 25 von Tabelle 2; es ist hieraus ersichtlich, daß durch Ausglühen und langsames Abkühlen auch beim Gußeisen der sehr bedeutende Hystereseverlust außerordentlich verringert, die Maximalpermeabilität beträchtlich erhöht werden kann. Tatsächlich hat man in dem rasch abgekühlten sogenannten „weißen" Gußeisen ein mechanisch und magnetisch sehr hartes Material, das in vieler Beziehung dem gehärteten Stahl nahe steht und teilweise auch zum Ersatz desselben herangezogen wird. So hat man neuerdings aus derartigem gehärteten Gußeisen permanente Magnete angefertigt, deren einziger Vorzug freilich die Billigkeit ist, denn in jeder anderen Beziehung stehen sie weit hinter den Magneten aus hartem Stahl zurück. Diese Härte verliert sich beim Ausglühen und langsamen Abkühlen, die Maximalpermeabilität kann bis zum vierfachen steigen, die Koerzitivkraft auf weniger als die Hälfte sinken, so daß in dieser Modifikation das Gußeisen für manche Zwecke, namentlich bei den schweren Magnetgestellen der Dynamomaschinen, zum Ersatz des teueren Stahlgusses verwendet wird. In der Technik bezeichnet man diese Modifikation als „graues" Gußeisen; seine dunklere Farbe rührt daher, daß beim Glühprozeß ein großer Teil des Kohlenstoffgehalts in Form von Graphit ausgeschieden wird, der, wie die mikroskopische Untersuchung zeigt, in Form von kleinen Nestern oder Adern zwischen den Eisenpartikelchen eingelagert ist. Hierdurch erklärt sich, wie wir demnächst sehen werden, die weitaus bessere Magnetisierbarkeit, aber auch die sehr viel geringere mechanische Festigkeit. Einen weiteren Fortschritt nach dieser Richtung hat Nathusius erzielt, dem es gelang, durch besondere, wohl hauptsächlich aus Silicium bestehende Zusätze zum Rohmaterial und geeignete Behandlung die Koerzitivkraft und den Hystereseverlust noch weiter zu verringern, die Permeabilität beträchtlich zu erhöhen.

7. Stahl. Mit dem Namen „Stahl" pflegt man, wie schon erwähnt, eine Eisen-Kohlenstofflegierung mit 0,5 bis etwa 1,5% Kohlenstoff zu bezeichnen. Die Natur dieser Legierungen ist erst neuerdings aufgeklärt worden durch die Fortschritte der Chemie und besonders der Mikrographie. Es ist nämlich gelungen, durch direkte mikroskopische Betrachtung und stark vergrößerte photographische Aufnahmen von Schliffen, die mit besonderen Aetzmitteln vorbereitet waren, außerordentlich feine Einzelheiten der Struktur aufzudecken. Hierbei hat sich folgendes ergeben:

Reines, kohlenstofffreies, sogenanntes α-Eisen — als Gefügebestandteil mit dem Namen Ferrit bezeichnet — erscheint unter dem Mikroskop zusammengesetzt aus ziemlich unregelmäßigen kristallinischen Gebilden, deren Größe von einigen Tausendstel Millimeter Durchmesser bis zu Stecknadelkopfgröße schwankt; verhältnismäßig große Körner erhält man durch lange andauerndes Ausglühen und langsames Abkühlen. Der Ferrit ist also als das eigentliche, magnetisch weiche Eisen zu betrachten. Fügen wir zu dem geschmolzenen reinen Eisen eine gewisse Menge — etwa 0,5% — Kohlenstoff, so löst sich dieser und bleibt auch nach dem Erstarren zunächst gelöst. Bei langsamem Ab-

kühlen scheidet sich allmählich aus der festen Lösung Ferrit aus; hierdurch reichert sich der Rest der Lösung immer mehr an Kohlenstoff an, bis sie bei einer Temperatur von etwa 700° rund 0,9% enthält. Bei noch weiter sinkender Temperatur kann diese Lösung als solche nicht mehr bestehen, sie verwandelt sich vielmehr plötzlich unter Wärmeentwickelung (erster Umwandlungspunkt oder Perlitpunkt) in Perlit. Dies Gebilde, welches seinen Namen dem durch seine Struktur hervorgerufenen Perlmutterglanz verdankt, ist zusammengesetzt aus abwechselnden, sehr dünnen Lamellen von Ferrit und Eisencarbid Fe_3C. Unsere Legierung im abgekühlten Zustand besteht somit aus einer Grundmasse von Ferrit mit eingebetteten Inseln von Perlit, die um so dichter werden, je höher der ursprünglich gelöste Kohlenstoffgehalt ist, bis sie etwa bei 0,9% den gesamten Raum einnehmen und die sogenannte „eutektische" Legierung bilden. Aus einer festen Lösung mit mehr als 0,9% Kohlenstoff scheidet sich bei der Abkühlung nicht Ferrit, sondern Eisencarbid aus, das als Gefügebestandteil den Namen „Cementit" erhalten hat; hierdurch wird die Lösung allmählich ärmer an Kohlenstoff, bis bei 700° wieder neben dem Cementit die eutektische Legierung von 0,9% übrig bleibt, die in Perlit übergeht. Wir haben also hier eine Grundmasse von Perlit mit mehr oder weniger zahlreichen Cementitinseln darin, mechanisch außerordentlich harten, langgestreckten Gebilden, die viel weniger magnetisierbar sind, als der Ferrit. Das Eisen, das bei hohen Temperaturen den Kohlenstoff in Lösung halten kann (bei 1100° bis zu 2%); pflegt man als γ-Eisen zu bezeichnen, während man unter β-Eisen die nicht magnetisierbare Modifikation des α-Eisens versteht, in welche dieses bei Temperaturen über 760° übergeht und welche Kohlenstoff entweder gar nicht oder doch nur in sehr geringen Mengen gelöst halten kann. γ-Eisen in Temperaturen über 700° ist nicht magnetisierbar.

Schreckt man es, statt es langsam abzukühlen, plötzlich in kaltem Wasser ab, dann hat es nicht mehr Zeit, Ferrit oder Cementit abzuscheiden und sich in Perlit zu verwandeln, sondern die feste Lösung bleibt als solche erhalten; wir kennen sie unter dem Namen „Gehärteter Stahl"; als Gefügebestandteil, der aus nadelartigen, sich unter Winkeln von 60° kreuzenden Strukturelementen besteht, wird er „Martensit" genannt. Diese Modifikation, welche das Material für die permanenten Magnete liefert, ist zwar bei Temperaturen unter 700° magnetisierbar, doch weichen seine magnetischen Eigenschaften von denjenigen des Ferrits und Perlits wesentlich ab.

Nach dem Vorhergegangenen wird es einleuchten, daß die übliche Festsetzung der Bezeichnung „Stahl" für eine Eisenlegierung mit mehr als 0,5% Kohlenstoff eigentlich durch nichts begründet ist, denn der Uebergang von niedrigen zu höheren Kohlenstoffgehalten erfolgt ohne jeden Sprung, die mechanischen und magnetischen Eigenschaften ändern sich ganz stetig mit dem Kohlenstoffgehalt, und der einzige, aber auch außerordentlich durchgreifende Unterschied zwischen perlitischem (weichem) und martensitischem (hartem) Stahl hängt nicht von der Menge, sondern von der Beschaffenheit des Kohlenstoffgehaltes ab; diese beiden Arten also sind es, die wir auch magnetisch, und zwar ohne Rücksicht auf die landläufige Bezeichnung, auseinanderhalten müssen.

Der Kohlenstoffgehalt in Perlitform ist magnetisch meist als Verunreinigung aufzufassen; sein Vorhandensein ist in dieser Beziehung durchaus unerwünscht und, wenn es überhaupt beabsichtigt ist, nur bedingt durch andere Anforderungen etwa mechanischer Art, die an das Material außerdem noch gestellt werden. Er bewirkt eine Vergrößerung der Koerzitivkraft, also auch eine Verbreiterung der Hystereseschleife und damit eine Vermehrung des Hystereseverlustes beim Ummagnetisieren, eine Verringerung der Permeabilität und des Sättigungswertes. Es ist deshalb außerordentlich wichtig, das zu Magnetkernen, Transformatorenkernen, Dynamogestellen usw. bestimmte Material so vollständig als möglich vom Kohlenstoff zu befreien und dasselbe einem Glühprozeß mit langsamer Abkühlung zu unterwerfen, um den unvermeidlichen Rest von Kohlenstoff wenigstens in Form von Perlit und nicht in der noch viel schädlicheren des Martensit zu behalten. Als Beispiel für derartige perlitische Stähle können die in Tabelle 2 unter 11 und 12 angeführten Materialien gelten, die schätzungsweise etwa 0,3 bis 0,4% Kohlenstoff enthalten dürften.

Der im Eisen gelöste Kohlenstoff, wie ihn der gehärtete Stahl enthält, wirkt in magnetischer Beziehung ähnlich, wie der perlitische Kohlenstoff, nur sehr viel stärker. Alle permanenten Magnete enthalten einen beträchtlichen Prozentgehalt davon (bis über 1%), und zwar meist in Verbindung mit Wolfram, Molybdän, Chrom u. dgl. Ob diese Zusätze eine direkte Wirkung auf das Eisen ausüben, wie der Kohlenstoff, oder ob sie nur indirekt wirken, indem sie die Perlitbildung verzögern oder unterdrücken, scheint noch nicht sicher zu sein. In jedem Falle hat man beim Härten dafür zu sorgen, daß die Ueberführung des glühenden Körpers aus der Hitze (800° bis 900°) in die Abschreckflüssigkeit möglichst momentan erfolgt. Die Nr. 26 bis 28 von Tabelle 2 geben einige Beispiele für die wichtigsten magnetischen Daten

von Magnetstahl: Die Magnetisierungskurve steigt langsam an, die Maximalpermeabilität ist noch geringer, als beim Gußeisen, die Induktion ist auch bei der hohen Feldstärke von $\mathfrak{H}=240$ noch niedrig, ebenso der hier nicht angegebene Sättigungswert von der Größenordnung $4\pi\mathfrak{J}_{Max} = 18000$ niedriger, als beim weichen Stahl, wenn auch höher, als beim Gußeisen, und zwar wird derselbe meist erst bei relativ sehr hohen Feldstärken, — etwa $\mathfrak{H}=5000$ bis 6000 — erreicht, während weiches Eisen schon bei etwa 2000 Gauß gesättigt ist. Die Hystereseschleife ist außerordentlich breit (vgl. auch Fig. 3 Nr. 5), die Koerzitivkraft daher sehr groß, die Remanenz mäßig hoch.

Remanenz und Koerzitivkraft sind es, die bei den permanenten Magneten eine Hauptrolle spielen. Die allgemein verbreitete Ansicht, daß die Remanenz von gehärtetem Stahl stets viel höher sei als diejenige von reinem Eisen, beruht auf einem Irrtum; meist ist das umgekehrte der Fall, und dies gilt auch von den äußersten Werten, denn die Remanenz des weichen Eisens kann bis gegen 15000 steigen, diejenige des harten Stahls übersteigt selten 11000. Der erwähnte Irrtum rührt daher, daß man meist nicht die wahre, sondern die scheinbare Remanenz im Auge hat.

Die wahre Remanenz ist eine Material-Eigenschaft, die man bei einem zyklischen, bis zu hohen Feldstärken ausgedehnten Magnetisierungsprozeß findet, wenn der zu untersuchende Körper die Form eines geschlossenen Ringes hat, oder wenn ein Probestab durch ein Joch von großem Querschnitt geschlossen ist, oder endlich, wenn die Länge eines drahtförmigen Probestücks sehr groß ist gegen seinen Durchmesser; in diesem Sinne wird auch der Ausdruck „Remanenz" in den vorliegenden Ausführungen stets gebraucht. Schneidet man dagegen aus dem Ring ein Stück heraus, oder nimmt man den Stab aus dem Joch, so bilden sich an den Enden Belegungen von freiem Magnetismus (Pole), die entmagnetisierend wirken, und zwar um so stärker, je kürzer, gedrungener der Stab, je weiter der Schlitz des Kreises, je breiter das Maul des Hufeisenmagnets ist. Diese scheinbare Remanenz also hängt nicht nur vom Material, sondern auch von den Dimensionen des Probestücks ab und kann, je nach diesem Dimensionsverhältnis, bei gleichem Material bald groß, bald klein sein. Andererseits ist die entmagnetisierende Wirkung der Enden um so geringer, je größer die Koerzitivkraft ist, und aus diesem Grunde wird die scheinbare Remanenz, die wir im gewöhnlichen Leben nur bemerken (denn die wahre Remanenz des geschlossenen Kreises macht sich nach außen hin überhaupt nicht bemerkbar), bei einem Stück gehärteten Stahls stets recht beträchtlich erscheinen, während sie bei einem Stück weichen Eisens von denselben Dimensionen infolge seiner außerordentlich geringen Koerzitivkraft nahezu verschwindet. Ist die wahre Magnetisierungsschleife der Stahlsorte bekannt, so findet man daraus nicht nur die wahre Remanenz, sondern man kann daraus für ein Ellipsoid und einen Stab von gegebenem Dimensionsverhältnis auch die scheinbare Remanenz zum Voraus berechnen; bei geschlitzten Ringen und Hufeisenmagneten ist das kaum angenähert möglich.

Die Kennzeichen guten Materials für permanente Magnete sind also: Große wahre Remanenz verbunden mit hoher Koerzitivkraft, zwei Eigenschaften, die sich allerdings nur innerhalb gewisser Grenzen vereinigt finden. In der folgenden Tabelle 3 sind die von Frau Curie bestimmten charakteristischen Werte verschiedener Magnetstahlsorten zusammengestellt. Dabei bedeutet t die günstigste Härtungstemperatur, C die Koerzitivkraft, R die Remanenz, $\mathfrak{B}$ die Induktion für die Feldstärke 500, E den Hystereseverlust pro ccm; die Indizes s und r geben an, ob die betreffenden Werke an Stäben von 20 cm Länge und 1 qcm Querschnitt, die nahezu bis zur Sättigung magnetisiert waren, oder an geschlossenen Ringen gewonnen wurden. Die außerordentlich große Differenz zwischen dieser scheinbaren und wahren Remanenz zeigt sich namentlich bei den beiden ersten Proben, wo die wahre Remanenz 7850 und 10490 cgs-Einheiten beträgt, die scheinbare dagegen nur 400 und 2800, eben, weil die Koerzitivkraft nur relativ gering ist. Bei dem Stahl von Allevard dagegen, welcher ungefähr die gleiche wahre Remanenz besitzt wie das zweite Material von Firminy, dagegen die dreifache Koerzitivkraft, ist auch die scheinbare Remanenz 2,5 mal so groß.

Man verlangt nun von einem guten permanenten Magnet nicht nur, daß er kurz nach der Herstellung eine hohe Remanenz besitzt, sondern daß er sie auch dauernd unverändert behält. Ohne weiteres ist dies wohl bei keinem Material der Fall; jeder frisch hergestellte permanente Magnet ist empfindlich gegen Erschütterungen und starke Temperaturschwankungen, und verliert durch dieselben einen Teil seiner Remanenz, und zwar hängt die Empfindlichkeit gegen äußere Störungen sowohl von der Art des Materials ab, also namentlich vom Kohlenstoffgehalt und anderen Zusätzen, als auch von der Art und der Temperatur der Härtung. In jedem Fall ist es vorteilhaft, permanente Magnete vor dem Gebrauch nach dem Strouhal-Barusschen Verfahren zu „altern", indem man sie zunächst einige Zeit einer Temperatur von 100° aussetzt und dann

Tabelle 3.

Material	Kohlenstoff in %	t^0	C_r	R	R_r	$\mathfrak{B}_r$	E_r
Kohlenstoffstahl von Firminy	0,06	1000	3,4	400	7850	20100	28000
	0,49	770	23	2800	10490	19600	108000
	1,21	770	60	5800	8110	15580	182000
Kohlenstoffstahl von Böhler (Steierm.) weich	0,70	800	49	5300			
extra zäh, hart	0,99	800	55	5200			
extra halbhart	1,17	800	63	5800			
Kupferstahl von Chatillon u. Commentry; 3,9% Cu	0,87	730	66	6200			
Chromstahl von Assailly; 3,4% Cr	1,07	850	57	6700			
Wolframstahl von Assailly; 2,7% W	0,76	850	66	6400	10050	16080	[illegible]
Wolframstahl von Böhler (Steierm.) Spezialst., sehr hart; 2,9% W	1,10	850	74	6700			
Boreasstahl, gehärt.; 7,7% W	1,96	800	85	4700			
Stahl von Allevard 5,5% W	0,59	770	72	7000	10680	16080	280000
Molybdänstahl von Chatillon u. Commentry 3,5% Mo	0,51	850	60	6700			
4,0% Mo	1,24	800	85	6700			

abwechselnd abkühlt und wieder erwärmt, bis das magnetische Moment bei Zimmertemperatur immer wieder denselben Wert annimmt, was man leicht daran erkennt, daß ein Magnetometer von dem Magnet aus gleichem Abstand um gleich viel Skalenteile abgelenkt wird. So dann wird der Magnet durch sanfte Schläge mit einem Holzhammer oder dergleichen so lange erschüttert, bis er auch hierdurch sich nicht mehr merklich ändert. Durch beide Manipulationen nimmt allerdings die Remanenz nicht unbeträchtlich ab, aber sie wird unter günstigen Umständen vollständig konstant, so daß weder kleinere Temperaturschwankungen noch auch leichte Erschütterungen eine dauernde Aenderung hervorrufen (vgl. dazu auch den Artikel „Magnete" Abschnitt 5).

In Figur 3 sind zur bequemeren Uebersicht die Hystereseschleifen einer Anzahl verschiedener, technisch gebräuchlicher Eisen- und Stahlsorten übersichtlich zusammengestellt und zwar von 1. weichem Eisen (Schmiedeeisen, Stahlguß, Dynamoblech), 2. ausgeglühtem Gußeisen, 3. ungeglühtem Gußeisen, 4. ungehärtetem Stahl, 5. gehärtetem Stahl.

8. Eisen-Silicium-Legierungen. Nach den Kohlenstofflegierungen dürften heute die größte Bedeutung für die Technik in magnetischer Beziehung die Siliciumlegierungen besitzen, auf deren Verwendbarkeit zu Dynamomaterial und namentlich zu Transformatorenblech die Reichsanstalt im Jahre 1902 aufmerksam machte, und die speziell auf dem Gebiete des Transformatorenbaues das reine sogenannte „normale" Eisenblech vollkommen verdrängt haben. Der Grund hierfür ist in folgendem zu suchen:

Bei der Ummagnetisierung der Transformatorenkerne, welche in Deutschland meist 50mal in der Sekunde erfolgt, wird nicht nur durch diesen Vorgang selbst ein Teil der aufgewendeten Energie in Wärme verwandelt (Hystereseverlust), sondern auch durch die sogenannten Wirbelströme, die durch den wechselnden Induktionsfluß im Eisen induziert werden. Dieser letztere Energieverlust, der proportional dem Quadrat der Induktion und dem Quadrat der Ummagnetisierungswechsel pro Sekunde wächst, wird um so größer, je dicker das Blech und je besser die elektrische Leitfähigkeit ist. Bei der ziemlich beträchtlichen Leitfähigkeit von reinem Eisen suchte man diesen Teil des Energieverlustes früher durch möglichste Verringerung der Blechdicke herunterzudrücken, was aber nur auf Kosten der Festigkeit und der Raumausnützung möglich war, da die unvermeidliche oberflächliche Oxydschicht (technisch „Zunderschicht" genannt) der geglühten Bleche einen verhältnismäßig um so größeren Raum einnimmt, je dünner die Bleche sind. Nun hatten die Engländer Barett, Brown und Hadfield in einer Untersuchung über die physikalischen Eigenschaften von Eisenlegierungen gefunden, daß Legierungen von Eisen und Silicium oder Aluminium gute magnetische Eigenschaften mit hohem elektrischen Leitwiderstand verbanden. In richtiger Würdigung der Bedeutung dieser Tatsache für den Transformatorenbau, die offenbar den genannten englischen Gelehrten entgangen war, veranlaßte die Reichsanstalt einige leistungsfähige deutsche Firmen zur Anstellung von Versuchen, dies spröde Material zu Blech auszuwalzen, die nach Ueberwindung beträchtlicher technischer Schwierigkeiten auch vollkommen gelangen, so daß es neuerdings sogar möglich geworden ist, für besonders schnelle Schwingungen, wie sie die drahtlose Telegraphie usw. verwendet, legiertes Blech von nur 0,05 mm Dicke herzustellen, während die Dicke der

für den Transformatorenbau gewöhnlich verwendeten Bleche meist 0,3 bis 0,5 mm beträgt.

Neben diesem einen Vorzug ergab sich im Laufe der Zeit noch ein zweiter, unvorhergesehener, daß auch die Koerzitivkraft und somit der Hystereseverlust der Siliciumlegierungen meist kleiner ist, als bei reinem Eisen, und daß die Permeabilität für niedrige Feldstärken beträchtliche Werte annimmt, während allerdings die Permeabilität bei hohen Feldstärken und der Sättigungswert mit zunehmendem Siliciumgehalt abnimmt (bei 5 % Siliciumgehalt ungefähr um 3000 cgs-Einheiten). Dies letztere ist darauf zurückzuführen, daß das Silicium auch in seiner Verbindung mit dem Eisen als unmagnetischer Körper wirkt und dadurch den wirksamen Eisenquerschnitt verringert.

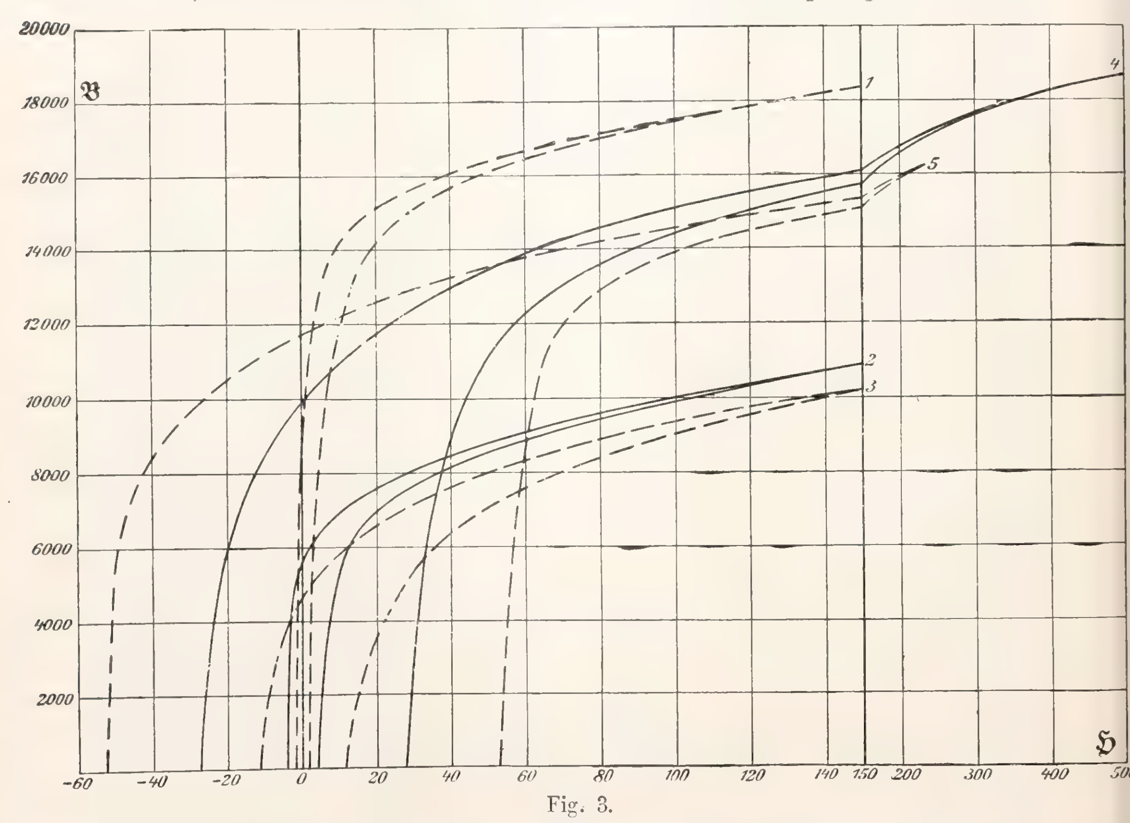


Fig. 3.

Schon hieraus geht hervor, daß die verbessernde Wirkung des Siliciums auf das Eisen auch in den unteren Feldstärken nicht eine direkte, sondern nur eine indirekte sein kann, und tatsächlich haben neuere, in der Reichsanstalt ausgeführte Versuche ergeben, daß die verbessernde Wirkung hauptsächlich auf der Beseitigung des schädlichen Einflusses der Verunreinigung durch Kohlenstoff beruht, indem das Silicium offenbar beim Glühen die Ausscheidung eines Teils des Kohlenstoffs in Form der unschädlichen Temperkohle (Graphit) veranlaßt oder begünstigt. Hierzu scheint allerdings ein beträchtlicher Zusatz von Silicium zu gehören — meist enthalten die sogenannten „hochlegierten“ Bleche etwa 4 % — welcher bei nicht ganz geeigneter thermischer Behandlung ungünstige mechanische Eigenschaften im Gefolge hat, das Blech spröde und brüchig macht und die zur Bearbeitung dienenden Instrumente angreift. Immerhin ist es auf diese Weise gelungen, die sogenannte „Verlustziffer“, d. h. den gesamten Energieverlust in der Sekunde pro kg und 50 Perioden auf etwa den dritten Teil desjenigen beim reinen Eisen herabzudrücken. In Tabelle 2 sind unter Nr. 20 und 21 zwei Beispiele für schwach und stark legiertes Blech gegeben, welche die geschilderten Eigenschaften auch zahlenmäßig zum Ausdruck bringen.

Als weiterer Vorzug der legierten Bleche ist hervorzuheben, daß die höheren Legierungen wenig oder gar nicht „altern“ (vgl. die vorhergehende Besprechung des Dynamoblechs).

Endlich ist noch zu erwähnen, daß die Anfangspermeabilität μ_0 vielfach diejenige der besten reinen Eisensorten noch übertrifft.

9. Eisen-Aluminium-Legierungen. Aluminium in Legierung mit Eisen wirkt ganz ähnlich wie Silicium; es verringert unter Umständen Koerzitivkraft und Hystereseverlust, sowie infolge der Vergrößerung des elektrischen Widerstandes auch den Wirbelstromverlust, drückt aber den Sättigungswert herab. Allgemeinere technische Anwendung scheinen die Aluminiumlegierungen in magnetischer Beziehung bisher noch nicht gefunden zu haben.

Versuche von Richardson an Legierungen mit 3 % bis 18 % Aluminium zeigten eigentümliche Umwandlungserscheinungen. Beispielsweise wächst die Magnetisierbarkeit einer 3,6 % Legierung bei mäßiger Feldstärke mit zunehmender Temperatur bis etwa $t_1 = 380^0$, nimmt dann ziemlich plötzlich ab um wieder langsam anzusteigen bis zu $t_2 = 660^0$ und fällt schließlich bis zur dritten Umwandlungstemperatur $t_3 = 755^0$, wo die Suszeptibilität $\varkappa$ auf etwa 0,055 gesunken, das Material also als paramagentisch zu bezeichnen ist. Mit wachsendem Aluminiumgehalt sinken diese drei Umwandlungspunkte sehr stark, so daß bei der Legierung mit 18 % t_2 schon bei -40^0 liegt, t_3 bei $+25^0$. Es scheint hiernach, daß diese Legierungen aus mehreren Bestandteilen zusammengesetzt sind, die sich magnetisch verschieden verhalten und deren Eigenschaften sich teilweise überdecken.

10. Eisen-Antimon-Legierungen. Solche sind von P. Weiß untersucht worden. Die Magnetisierbarkeit nimmt mit steigendem Antimongehalt außerordentlich stark ab; für $\mathfrak{H} = 300$ beträgt die Suszeptibilität $\varkappa$ bei 43 % etwa 0,5, bei 74 % Antimon nur noch 0,00009, während der entsprechende Wert für reines Eisen etwa 5,5 ist.

11. Eisen-Mangan-Legierungen. Der Einfluß des Mangans auf die Magnetisierbarkeit des Eisens ist schon deshalb wichtig, weil es fast in allen Stahlgußsorten in einer Menge von 0,2 bis 0,4 % vorhanden ist. Zumeist wird es seiner Oxydierbarkeit halber zugesetzt, um den Sauerstoffgehalt des Eisens und damit die Neigung zur Bildung von Gußblasen zu verringern. Schon das in Tabelle 1 angeführte Beispiel einer magnetisch ausgezeichneten Stahlgußsorte mit 0,4% Mangan zeigt, daß dies in so geringen Mengen als unschädlich angesehen werden darf, vorausgesetzt, daß nicht gleichzeitig auch noch ein merklicher Kohlenstoffgehalt vorhanden ist, Es wird nämlich dem Mangan die Eigenschaft zugeschrieben, die Perlitbildung aufzuhalten und die Martensitbildung zu begünstigen, so daß bei Vorhandensein von Mangan eine besonders langsame Abkühlung des geglühten Eisens geboten erscheint.

Ganz anders sind die magnetischen Eigenschaften höherer Manganlegierungen: Mit 12% Mangan erhält man eine außerordentlich spröde, praktisch unmagnetisierbare Legierung, deren Suszeptibilität von der Größenordnung 0,001 bis 0,3 in weiten Grenzen von der Feldstärke unabhängig ist. Im Gegensatz zum Stahl wird das Material schmiegsamer und auch stärker magnetisierbar durch Abschrecken in kaltem Wasser; nach Versuchen von Frau Curie soll dann die Koerzitivkraft etwa 135 betragen.[1])

Höhere Legierungen mit 55 % Mangan, 11 % Eisen, 25 % Aluminium, 2,3 % Kohlenstoff usw. sind schon früher als ferromagnetisch erkannt worden, doch hat man damals wenig Wert darauf gelegt, bis Heuslers aufsehenerregende Entdeckung der nach ihm benannten ferromagnetischen Mangan-Aluminium-Kupfer-Legierungen, von denen später die Rede sein wird, das Interesse an diesen früheren Befunden wieder wachrief. Wir beobachten also beim Mangan, das bis jetzt meist als paramagnetisch, nicht als ferromagnetisch betrachtet wurde, die außerordentlich eigentümliche und bis jetzt noch unaufgeklärte Tatsache, daß es das hochmagnetische Eisen unmagnetisch und umgekehrt unmagnetische Substanzen magnetisch machen kann.

12. Nickelstahl-Legierungen. Etwas Aehnliches finden wir beim Nickelstahl, nur liegen die Verhältnisse hier insofern noch eigentümlicher, als hier durch das Zusammenwirken von zwei unzweifelhaft ferromagnetischen Komponenten eine unmagnetische Resultante entstehen kann. Während nämlich kleine Zusätze von Nickel zum Eisen keinen wesentlichen Unterschied in der Magnetisierbarkeit hervorbringen, ja nach Angaben einzelner Beobachter sogar günstig wirken sollen, erhält man in der Legierung von 25 % Nickel und 75 % Eisen ein bei gewöhnlicher Temperatur ganz unmagnetisches Material. Dies hat technisch für unsere Kriegsmarine eine hohe Bedeutung gewonnen. Durch die mächtigen Stahlmassen der Panzerschiffe wurden nämlich die Kompasse derartig stark beeinflußt, daß ihre Angaben trotz der verschiedensten Schutzmittel unzuverlässig wurden. Der Ersatz des Stahles in der Nähe der Kompasse durch andere Metalle oder Holz kam aus Festigkeitsgründen nicht in Betracht, dagegen bewährte sich die erwähnte unmagnetische Nickelstahllegierung, die sich mechanisch durch außerordentlich große Festigkeit und Zähigkeit auszeichnet und schon aus diesem Grunde technisch auch anderweit

[1]) Nach einer während des Druckes erschienenen Abhandlung von W. Matthesius verhalten sich die Eisen-Mangan-Legierungen in vieler Beziehung ganz ähnlich, wie die später besprochenen Nickelstahl-Legierungen.

Verwendung findet. Natürlich ist die Verwendung des Nickelstahls auf den Kriegsschiffen außerordentlich kostspielig, so daß ein Ersatz durch ein billigeres, gleichwertiges Material oder der Ersatz des Kompasses durch ein störungsfreies Instrument im Interesse des Nationalvermögens dringend erwünscht wäre.

Es soll hier, wenn auch nicht streng zur Sache gehörig, doch wenigstens darauf hingewiesen werden, daß gewisse Nickelstahllegierungen unter dem Namen „Invar" (35 % Nickel usw.) wegen ihrer außerordentlich geringen thermischen Ausdehnung auch im Maß- und Gewichtswesen eine beträchtliche Bedeutung gewonnen haben.

Die Erscheinung der unmagnetischen Phase der Nickelstahllegierungen erklärt sich durch eine ungewöhnlich starke Verschiebung des magnetischen Umwandlungspunktes. Wie schon früher erwähnt, verliert reines Eisen erst bei einer Temperatur von etwa 760° seine Magnetisierbarkeit. Dieser magnetische Umwandlungspunkt rückt nun mit steigendem Nickelgehalt immer tiefer; bei 22 % Nickel liegt er schon bei 500°, und, einmal unmagnetisch geworden, bleibt dann die Legierung auch unmagnetisch bei der Abkühlung, bis sie in der Gegend von Null Grad plötzlich wieder magnetisch wird. Niedrigere Legierungen verlieren ihre Magnetisierbarkeit bei höherer Temperatur und werden auch bei höherer Temperatur wieder magnetisch. Andererseits ist es durch besondere Zusätze und Verfahren, die Geheimnis der einzelnen Firmen sind, gelungen, den Wiedereintritt der Magnetisierbarkeit bis unter die Temperatur der flüssigen Luft herabzudrücken, so daß man hierdurch über ein nahezu unmagnetisches Material mit einer Permeabilität von 1,02 bis 1,1 verfügt, das tatsächlich dauernd unmagnetisch bleibt. Gerade auf den letzteren Umstand muß selbstverständlich auch bei der Marine der größte Wert gelegt werden, und deshalb wird jede neue Gußcharge darauf untersucht, ob sie auch bei Kältegraden, wie sie ein harter Winter bringen kann, unmagnetisch bleibt.

Bei höheren Gehalten an Nickel über 25 % hört diese eigentümliche „Temperatur-Hysterese" auf, und man erhält wieder normale Verhältnisse, nur ist die Magnetisierbarkeit scheinbar etwas geringer, als man aus der prozentigen Zusammensetzung von Eisen und Nickel erwarten sollte. Nach Guillaume, der besonders die thermischen Eigenschaften der Nickelstahllegierungen studierte, bezeichnet man die Legierungen mit weniger als 25 % Nickel als irreversibel, die höheren als reversibel. Die magnetischen Verhältnisse sind schon früher von Hopkinson, Dumas, Dumont und Anderen untersucht worden, sie liegen jedoch nach den neuesten Untersuchungen von Hilpert und Colver-Glauert noch wesentlich verwickelter, als man bisher annahm. Kühlt man nämlich einen bei 0° unmagnetischen Stab einer reinen, 25 % Nickelstahllegierung immer weiter ab und bringt ihn dazwischen immer wieder rasch auf eine Temperatur von etwa 10°, bei der seine Magnetisierbarkeit gemessen wird[1]), so findet man, daß mit abnehmender Temperatur die Magnetisierbarkeit immer stärker wird; nach der Abkühlung auf —180° beträgt — immer für die Feldstärke $\mathfrak{H} = 300$ — die Induktion $\mathfrak{B}$ etwa 11000. Steigert man nun die Temperatur wieder, so nimmt die Magnetisierbarkeit nicht etwa wieder ab, sondern zu, bis etwa 450° ($\mathfrak{B} = 12000$), um dann bei noch höherer Erwärmung zu sinken und bei 700° vollständig zu verschwinden. Sodann beginnt eine neue Phase der Magnetisierbarkeit, welche bei 900° ein Maximum erreicht ($\mathfrak{B} = 2000$) und bei 1000° nahezu vollständig verschwunden ist. Bei 1250° ist das dritte Maximum der Magnetisierbarkeit erreicht, das auch noch bei weiterer Temperatursteigerung erhalten bleibt, ebenso wie beim dauernden Abkühlen auf 0°. Wir haben es also hier bei demselben Material mit einer ganzen Reihe von magnetischen Zuständen zu tun, deren Auftreten im wesentlichen nur vom Temperaturgang abhängt.

Aehnliche, aber weniger ausgeprägte Erscheinungen zeigen nach Hilpert die niedrigen Nickelstahllegierungen, während ein Stahl mit 31 % Nickel durch die thermische Behandlung keine wesentlichen magnetischen Veränderungen erfuhr.

13. Magnetit; Pyrrhotin; Hämatit. Von natürlich vorkommenden magnetischen Eisenverbindungen möge noch erwähnt werden der Magneteisenstein (Magnetit) von der chemischen Zusammensetzung Fe_3O_4, auf dessen Vorkommen in der Nähe der Stadt Magnesia die Entstehung des Namens „Magnet" zurückgeführt wird. Er hat nach den Messungen von P. Weiß einen Sättigungswert $4\pi J_{Max}$ von etwa 7200, eine beträchtliche Koerzitivkraft (etwa 50 Gauß) und kann vermöge seines remanenten Magnetismus kleine Gegenstände, Eisenfeile, kleine Nägel usw. festhalten; ähnlich der Pyrrhotin, der Hämatit und andere. Alle diese Substanzen haben keinerlei praktisches Interesse, wohl aber ein theoretisches, da wir es bei ihnen nicht mit amorpher oder kristallinischer Struktur zu tun haben, sondern z. T. mit wohl ausgebildeten Kristallen mit einer gegebenen und

[1]) Auch bei der weiteren Beschreibung der Beobachtungen von Hilpert ist stets stillschweigend vorausgesetzt, daß der Stab nach mehrstündiger Erwärmung bei irgendwelcher Temperatur plötzlich auf 10° gebracht und bei dieser Temperatur untersucht wurde.

bekannten Gruppierung der Moleküle, und gerade die Anordnung der Moleküle dürfte bei den magnetischen Vorgängen, die ihrem eigentlichen Wesen nach immer noch so gut wie unbekannt sind, eine Hauptrolle spielen

14. Nickel; Kobalt; Mangan. Auch die beiden anderen unzweifelhaften Repräsentanten des Ferromagnetismus, Nickel und Kobalt, haben als magnetische Materialien eine ganz untergeordnete Bedeutung und finden technisch wohl kaum eine Anwendung. Ihre Magnetisierungskurve ähnelt der des Gußeisens, namentlich diejenige des Kobalts, während diejenige des Nickels wesentlich flacher verläuft. Einzelheiten sind aus der kleinen Tabelle 4 zu ersehen.

Tabelle 4. [1])

	Nickel	Kobalt
$\mathfrak{B}$ für $\mathfrak{H} = 100$	5100	9 300
$4\pi J_{Max}$	6000	17 700
μ_{Max}	300	175
Remanenz	3400	3 100
Koerzitivkraft	7,5	12

Der magnetische Umwandlungspunkt von Nickel wird sehr verschieden zwischen 320° und 380° angegeben; seine Lage wird offenbar durch Verunreinigungen stark beeinflußt. Der Umwandlungspunkt des Kobalts liegt bei etwa 1100°.

Ob Mangan unter gewöhnlichen Umständen als magnetische oder unmagnetische Substanz aufzufassen ist, scheint noch zweifelhaft zu sein. Bisher hatte es sich stets zwar als stark paramagnetisch aber keineswegs ferromagnetisch erwiesen, und auch P. Weiß fand Manganpulver nur paramagnetisch. Als er dasselbe jedoch in einem Magnesiagefäß im elektrischen Ofen schmolz, zeigte es eine vollständig ferromagnetische Natur und eine Koerzitivkraft, welche diejenige des Magnetstahls um das Zehnfache übertraf. Auch hier dürfte wohl der molekulare bezw. Kristallisations-Zustand eine ausschlaggebende Rolle spielen.

15. Heuslersche Legierungen. Großes und berechtigtes Aufsehen erregte in der wissenschaftlichen Welt die im Jahre 1898 erfolgte, aber erst später veröffentlichte Entdeckung Heuslers, daß beim Zusammenschmelzen der unmagnetischen Metalle Kupfer, Mangan und Aluminium etwa in der Zusammensetzung 30% Mangan und 15% Aluminium eine Legierung mit vollkommen ferromagnetischen Eigenschaften entsteht, und zwar ist die Magnetisierbarkeit von der Größenordnung derjenigen des Gußeisens, der Sättigungswert etwa $^3/_4$mal so groß. Diese Entdeckung hat eine Flut umfangreicher Untersuchungen und Veröffentlichungen namentlich aus dem von Richarz geleiteten physikalischen Laboratorium der Universität Marburg hervorgerufen, indem nicht nur Heusler und Richarz selbst, sondern auch eine ganze Anzahl ihrer Schüler an der Aufklärung dieser seltsamen Erscheinung tätig waren. Hier kann natürlich nur auf einige der interessantesten Ergebnisse kurz eingegangen werden.

Hervorzuheben ist zunächst, daß in der oben genannten Legierung das Aluminium durch eine große Anzahl anderer Metalle vertreten werden kann, selbst durch das diamagnetische Wismut, und daß jede dieser Legierungen natürlich ihre besonderen magnetischen Eigenschaften besitzt, die wiederum außerordentlich stark von der thermischen Behandlung abhängen. Wie schon Heusler selbst sehr bald erkannte, erreichen diese Legierungen ihre höchste Magnetisierbarkeit erst durch eine sogenannte „Alterung", d. h. durch eine dauernde Erwärmung auf höhere Temperatur.

Auch die Heuslerschen Legierungen haben, ebenso wie jede andere ferromagnetische Substanz, einen Umwandlungspunkt, bei dessen Ueberschreiten sie unmagnetisch werden; derselbe liegt, je nach der Art der Zusammensetzung, zwischen 350° und Zimmertemperatur. Beispielsweise hat die Legierung aus Kupfer mit 6% Blei, 16% Mangan und 8% Aluminium den Umwandlungspunkt bei 60° bis 70°, sie liefert also ein außerordentlich brauchbares Objekt für Demonstrationszwecke, da sie schon im Wasserbad ihren remanenten Magnetismus verliert; für Legierungen mit 12% Mangan und 25% Aluminium ist der Umwandlungspunkt bis auf 5° herabgedrückt. Neuere, umfangreiche Untersuchungen von Take haben ergeben, daß bei langsam abgekühlten Legierungen die Umwandlungstemperatur verhältnismäßig hoch liegt und durch Alterung kaum mehr verändert wird, daß dagegen bei rasch abgekühlten die Umwandlungstemperatur anfangs viel niedriger liegt, sich aber durch das Altern beträchtlich hebt, so daß schließlich die Umwandlungstemperaturen für beide Arten ungefähr zusammenfallen.

Mit den übrigen magnetischen Eigenschaften variierte natürlich auch die Koerzitivkraft und der Flächeninhalt der Hystereseschleife von Fall zu Fall, ohne daß diese Verhältnisse besonderes Interesse erregen würden, wenn nicht Starck und Asteroth bei besonders behandelten Legie ungen ganz eigentümliche Erscheinungen gefunden hätten. Es ergab sich nämlich, daß schmiedbare Legierungen mit etwa 17% Mangan und 9% Aluminium, wenn sie über ihren bei 210°

[1]) Nach Versuchen von Ewing; die Sättigungswerte nach Messungen von P. Weiß.

liegenden Umwandlungspunkt erhitzt, dann in kaltem Wasser oder Quecksilber abgeschreckt und bei 140° gealtert wurden, fast alle Hysterese verloren hatten, besonders, wenn die Proben nicht gegossen, sondern geschmiedet waren. Bei nochmaligem Erwärmen bis über den Umwandlungspunkt und langsamem Abkühlen zeigen die Proben umgekehrt eine um so größere Hysterese, je langsamer die Abkühlung stattfindet. Es tritt also hier gerade die entgegengesetzte Erscheinung auf, als bei den Kohlenstofflegierungen. Take hat auch diese komplizierten Verhältnisse genau untersucht und bis zu einem gewissen Grade aufgeklärt.

Die außerordentliche Wichtigkeit der Entdeckung der Heuslerschen Legierungen besteht nicht sowohl in ihrer technischen Verwendbarkeit, denn diese ist zurzeit noch fraglich und dürfte kaum großen Umfang erreichen, sondern in der wissenschaftlichen Ausbeute, welche sie bereits geliefert haben und noch weiter zu liefern versprechen. Ist doch durch sie der Nachweis erbracht worden, daß die ferromagnetischen Eigenschaften nicht, wie man bis vor wenigen Jahren annehmen mußte, auf drei Metalle und deren Legierungen beschränkt sind, sondern auch bei einer großen Anzahl von anderen Substanzen auftreten, falls die nötigen Vorbedingungen hierfür erfüllt sind. Diese Bedingungen zu finden und zu ordnen sind zahlreiche Hilfskräfte in Bewegung, und es läßt sich hoffen, daß es unter diesen Umständen in nicht allzu ferner Zeit gelingen wird, Licht in die bis jetzt noch so dunklen Vorgänge der Magnetisierung zu bringen. An Versuchen zur Erklärung hat es nicht gefehlt, namentlich haben Heusler und Richarz und schon früher Weber, Ewing, Langevin, Weiß, Gans u. a. Theorien aufgestellt, welche wohl mit wichtigen Teilen der ferromagnetischen und paramagnetischen Erscheinungen im Einklang stehen, doch sind die Verhältnisse noch zu wenig geklärt, als daß wir hier näher darauf eingehen könnten.

16. Einfluß der Temperatur. Es erübrigt noch, einige Worte über den Einfluß der Temperatur auf die Magnetisierbarkeit und namentlich den remanenten Magnetismus zu sagen. Dieser Einfluß ist im allgemeinen nicht groß und kann meist vernachlässigt werden. Eine gewisse Wichtigkeit hat er für solche permanente Magnete, die als Vergleichsnormal oder dergleichen dienen sollen; man kann annehmen, daß das magnetische Moment eines durch die früher beschriebene Behandlung reversibel gewordenen Magnets mit wachsender Temperatur pro Grad um einige Zehntausendstel ab- und mit abnehmender Temperatur wieder zunimmt, doch hängt die Größe dieses „Temperaturkoeffizients“ vom Material usw. ab und muß für jeden Magnet besonders bestimmt werden. Von derselben Größenordnung ist auch die Aenderung des Sättigungswertes von Eisen, Nickel und Magneteisenstein zwischen der Temperatur des siedenden Wasserstoffs (—253°) und der Zimmertemperatur, denn, wie neuerdings P. Weiß und H. Kamerlingh Onnes durch sehr schwierige und exakte Messungen nachwiesen, ist der Sättigungswert bei —253° für Eisen etwa das 1,02fache, für Nickel und Magneteisenstein das $1{,}05_5$fache vom Sättigungswert bei +17°.

Auch die Permeabilität des Eisens ändert sich nicht wesentlich mit der Temperatur, nur in der Nähe des Umwandlungspunktes wächst sie beträchtlich an, und zwar außerordentlich stark für niedrige Feldstärken, weniger stark für hohe. Ganz kurz vor dem Umwandlungspunkt tritt das Entgegengesetzte ein, die Permeabilität nimmt sehr rasch ab für niedrige, langsamer für sehr hohe Feldstärken. Eine allgemeine Gesetzmäßigkeit hat sich hierfür nicht finden lassen; wohl aber ist dies der Fall bei Temperaturen oberhalb des Umwandlungpunktes, denn auch hier ist die Suszeptibilität der ferromagnetischen Körper nicht etwa Null, sondern nur relativ klein. Bezeichnet man dieselbe mit $\varkappa$, die jeweilige Temperatur mit t, die Temperatur des Umwandlungspunkts mit t_1 (beim Eisen also 760°), so gilt $\varkappa(t-t_1) = \text{const.}$, d. h. die Suszeptibilität nimmt ab umgekehrt proportional mit der Temperatur über dem Umwandlungspunkt. Allerdings hat diese Konstante, wie P. Weiß gezeigt hat, bei dem Eisen für verschiedene Temperaturintervalle bis zu 1400° hinauf verschiedene Werte, die zwischen 0,03 und 0,07 liegen; dies scheint auf verschiedene Modifikationen des Eisens hinzudeuten. Ein analoges Gesetz gilt auch für Nickel, Kobalt und Magnetit.

17. Paramagnetische und diamagnetische Substanzen. Auf die paramagnetischen Substanzen läßt sich, mit wenigen Ausnahmen, das gleiche Gesetz anwenden, wenn man annimmt, daß deren Umwandlungspunkt mit dem Nullpunkt der absoluten Temperatur zusammenfällt; dann wird $\varkappa\vartheta = \text{const.}$, die Suszeptibilität der paramagnetischen Körper ist also umgekehrt proportional der absoluten Temperatur (Gesetz von Curie). Bei den diamagnetischen Körpern scheint die Suszeptibilität überhaupt unabhängig von der Temperatur zu sein, doch sind die betreffenden Messungen bei der geringen Größe der in Betracht kommenden Werte natürlich sehr schwierig und unsicher. Wir haben also hier ein neues Unterscheidungsmerkmal für die paramagnetischen und diamagnetischen Körper, welches das früher erwähnte unter Umständen ergänzen kann.

Nach den neueren Ansichten scheinen die diamagnetischen Eigenschaften jedem Körper eigentümlich zu sein, aber bei den paramagnetischen Körpern mehr oder weniger überlagert und verdeckt zu werden durch die stärkeren paramagnetischenEigenschaften. Es entsteht somit, namentlich bei Lösungen usw., die schwierige Aufgabe, die einzelnen Beträge voneinander zu trennen, um einen Schluß auf die Eigenschaften der Bestandteile ziehen zu können; tatsächlich weichen auch die nach verschiedenen Methoden gewonnenen Resultate verschiedener Forscher mitunter recht erheblich voneinander ab. In der folgenden Tabelle 5 sollen nun als Beispiele die ungefähren Werte der Suszeptibilität von bekannten anorganischen Substanzen bei Zimmertemperatur gegeben werden, jedoch bezogen nicht auf die Volumeneinheit, sondern, wie dies hier meist geschieht, auf die Masseneinheit. Hierbei bedeutet das + Vorzeichen paramagnetische, das negative diamagnetische Eigenschaften. Wegen der außerordentlich geringen Größe ist das Millionenfache des Betrags angegeben.

Tabelle 5.

	$10^6 . k$		$10^6 . k$
Aluminium . .	+ 1,8	Phosphor (weiß)	— 0,9
Antimon . . .	— 0,7	„ (rot) .	— 0,2
Blei	— 0,1	Platin	+ 1,5
Bor	+ 4,3	Quarz	— 0,2
Brom	— 0,4	Quecksilber . .	— 0,2
Gold	— 0,2	Schwefel . . .	— 0,3
Kalium	+ 3,6	Silber	— 0,2
Kohlenstoff (Diamant) . .	— 0,3	Silicium . . .	+ 0,2
		Wasser	— 0,8
Kupfer	— 0,1	Wismut	— 1,4
Magnesium . .	+ 0,6	Zink	— 0,1
Natrium	+ 2,2		

Die Salze der ferromagnetischen Körper erreichen meist weit höhere Werte; sie liegen der Größenordnung nach etwa zwischen 20 und 100, und von derselben Größenordnung sind auch die Werte bei den Mangansalzen. Die letztere Tatsache scheint ebenfalls für die schon durch die Ergebnisse von Weiß und Heusler geforderte Annahme zu sprechen, daß das Mangan, wenigstens in bestimmten Modifikationen, als ferromagnetischer Körper zu betrachten ist.

Von den Gasen ist Sauerstoff stark, Wasserstoff und Stickstoff schwach paramagnetisch, was sich besonders bei den verflüssigten Gasen leicht zeigen läßt.

Eine Abhängigkeit der Suszeptibilität von der Feldstärke sowie Erscheinungen der Hysterese, die bei den ferromagnetischen Körpern eine so bedeutende Rolle spielen, konnte bisher weder bei den paramagnetischen, noch bei den diamagnetischen Körpern nachgewiesen werden.

Literatur. *1. Lehrbücher:* **H. du Bois,** *Magnetische Kreise. Berlin 1894.* — **J. A. Ewing,** *Magnetische Induktion in Eisen usw. Deutsche Ausg. Berlin 1892.* — **Erich Schmidt,** *Magnet. Untersuchung des Eisens usw. Halle 1900.* — **K. Strecker,** *Hilfsbuch für die Elektrotechnik. Berlin 1907.* — *2. Tabellen und Berichte:* **Landolt-Börnstein,** *Physikalisch-chemische Tabellen. Berlin 1905 (Literaturübersicht bis 1904).* — **H. du Bois,** *Propriétés magnétiques de la matière ponderable. Rapp. presenté au Congrés international de Physique réuni à Paris en 1900.* — **E. Warburg,** *Sur l'hysteresis. Rapp. presenté au Congr. . . . . (Die beiden letzten Abhandlungen enhalten genaue Literaturübersichten bis 1900.)* — **F. Richarz,** *Ueber den Magnetismus von Legierungen. Physikal. Zeitschr.* **12,** *151 bis 158, 1911 (Literaturübersicht über die Heusler'schen Legierungen bis 1910).* — *3. Einzelabhandlungen:* **G. Belloc,** *Gas occlus dans les aciers. Compt. rend.* **145,** *1280 bis 83, 1907;* **149,** *672 bis 73, 1909.* — **O. Boudouard,** *Extraction des gas contenus dans les métaux. Compt. rend.* **145,** *1283, 1907.* — **E. Gumlich,** *Verschiedene Aufsätze in der Elektrotechn. Zeitschr. und den Ann. d. Physik.* — **R. A. Hadfield and B. Hopkinson,** *The magnetic properties of iron and its alloys in intense fields. Journ. of the Institut. of electr., engineers* **46,** *235 bis 309, 1911.* — **F. Hilpert und Ed. Colver-Glauert,** *Magnet. Eigenschaften von Nickelstahlen. Zeitschr. f. Elektrochemie* **17,** *750 bis 761, 1911.* — **W. Kaufmann und W. Meier,** *Magnet. Eigensch. elektrolytischer Eisenschichten. Phys. Zeitschr.* **12,** *513 bis 522, 1911.* — **W. Matthesius,** *Studien über die magnetischen Eigenschaften von Mangan- und Nickelstählen. Dissert. Berlin. Techn. Hochschule 1911.* — **P. Weiſs,** *Verschiedene Aufsätze in den Compt. rend. und Journ. de phys.*

E. Gumlich.

Magnetische Influenz.

1. Einleitung. Aufgabe und Voraussetzungen. 2. Die Permeabilität μ: a) Aenderung des $\mathfrak{M}$-Linienverlaufes durch Aenderung von μ. b) Elektrisches Analogon. c) Brechungsgesetz der $\mathfrak{M}$-Linien. d) Klassifikation der Körper nach μ. e) Vergleichung von μ-Werten. f) Schirmwirkung des Eisens. 3. Die magnetischen Mengen und die Magnetisierung: a) Zusammenhang zwischen wahren, freien und induzierten Mengen. b) Feld von überall gleichem und Feld von veränderlichem μ. Feldberechnung. c) Berechnung der induzierten Mengen. d) Induzierte Magnetisierung und Suszeptibilität. e) Unterschied zwischen Para- und Diamagnetismus. f) Feld im Innern fester Körper. g) Molekulartheorie des Magnetismus. 4. Das Superpositionsprinzip: Das Superpositionsprinzip für den Fall der magnetischen Ungleichartigkeit der Körper im Felde. 5. Die Stromfelder: a) Die Gleichwertigkeit von Doppelschicht und linearem Strom besteht ganz all-

gemein. b) Der magnetische Kreis. c) Streuung bei vollständigem Kreis. d) Streuung bei aufgeschnittenem Kreis. e) Magnetisierung von Stäben und Ellipsoiden. Entmagnetisierungsfaktor. 6. Die Energie des Feldes: a) Ableitung des Ausdruckes für die Energie statischer Felder. b) Uebertragung auf elektromagnetische Felder. Selbstinduktionskoeffizient. c) Verschiedene Energieänderung des statischen und elektromagnetischen Feldes durch denselben Vorgang. d) Die Arbeit der magnetischen Kräfte im statischen Felde ist gleich der Abnahme der magnetischen Energie. e) Die Arbeit der magnetischen Kräfte im elektromagnetischen Felde ist gleich der Zunahme der magnetischen Energie. 7. Der Zustand des Feldes: a) Der Längszug in den Feldlinien. b) Der Querdruck der Feldlinien. c) Zurückführung der magnetischen Kräfte auf die Maxwellschen Spannungen. d) Die Maxwellschen Spannungen sind keine elastischen Spannungen. 8. Die magnetischen Kräfte: a) Prinzip der Kraftberechnung. b) Allgemeines Gesetz für die Bewegung von Körpern im Felde. c) Einstellung des Ellipsoids und Bewegung der Eisenfeilspäne. d) Tragkraft von Magneten. e) Magnetostriktion.

1. Einleitung. Aufgabe und Voraussetzungen. Aufgabe dieses Artikels ist es, zu untersuchen, inwieweit die im Artikel „Magnetfeld“ unter beschränkenden Bedingungen aufgestellten Gesetze magnetischer Felder ihre Gültigkeit beim Fallenlassen dieser Bedingungen behalten; ferner, einen theoretischen Einblick zu geben in den eigentümlichen magnetischen Feldzustand, von dem in jenem Artikel die Rede ist (vgl. den Artikel „Magnetfeld“ 1 a).

Die dort gemachten Einschränkungen sind: a) bei Aufstellung des Superpositionsprinzips, daß alle im magnetischen Feld befindlichen Körper völlig magnetisch gleichartig, d. h. von gleicher Permeabilität μ sein sollen; b) bei Untersuchung der Stromfelder, daß die Ströme nur von Luft umgeben sein sollen.

Es seien also im folgenden ganz beliebige Körper von beliebiger Permeabilität μ im Felde vorhanden.

Das Feld sei dargestellt durch Linien, die Richtung und Größe des Vektors $\mathfrak{M} = \mu \mathfrak{H}$ ($\mathfrak{H}$ magnetische Feldstärke) veranschaulichen. Innerhalb der permanenten Magnete sollen diese $\mathfrak{M}$-Linien Endpunkte besitzen in den wahren magnetischen Mengen (vgl. den Artikel „Magnetfeld“ S. 598). Jede $\mathfrak{M}$-Linie entspringt in der wahren nordmagnetischen Menge 1, dem Quellpunkt nach Maxwell, und mündet in der südmagnetischen Menge 1, der sogenannten Sinkstelle. Außerhalb der Magnete sind die $\mathfrak{M}$-Linien mit den Induktions- oder $\mathfrak{B}$-Linien identisch (vgl. den Artikel „Magnetfeld“ S. 597). Eisenfeilspäne zeichnen den Verlauf der $\mathfrak{M}$-Linien nach wie den der $\mathfrak{H}$-Linien. Durch die Grenzfläche zwischen zwei nicht permanent magnetischen Körpern von verschiedener Permeabilität μ treten die $\mathfrak{M}$-Linien in ungeänderter Zahl hindurch (vgl. den Artikel „Magnetfeld“ S. 597). Zerlegt man ihre Gesamtheit in Bündel oder — sofern man nur die das Bündel abgrenzenden $\mathfrak{M}$-Linien ins Auge faßt — in Röhren, so gilt für jede Röhre der Satz von der Erhaltung des $\mathfrak{M}$-Linienflusses (vgl. den Artikel „Magnetfeld“ S. 596).

2. Die Permeabilität μ. 2 a) Aenderung des $\mathfrak{M}$-Linienverlaufs durch Aenderung von μ. In das Feld etwa zweier entgegengesetzter Magnetpole (vgl. den Artikel „Magnetfeld“ S. 583) werde ein unmagnetisches Stück weichen Eisens gebracht. Das Eisenfeilbild (Fig. 1) zeigt, daß die vorher nahezu parallelen

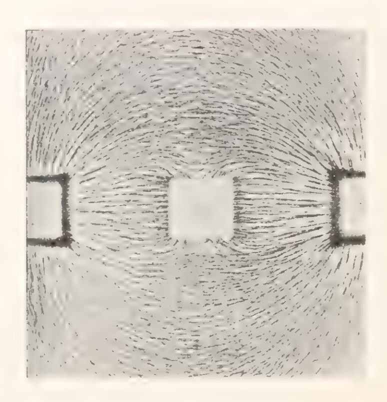


Fig. 1.

$\mathfrak{M}$-Linien sich nach dem Eisen zusammendrängen und durch dasselbe hindurchlaufen, anstatt den Verlauf, den sie vor Einbringen des Eisenstücks hatten, beizubehalten.

Ein Analogon zu dieser Erscheinung liefert der folgende Versuch. Man lasse eine zähe Flüssigkeit (Glyzerin) zwischen zwei parallelen, dicht aneinander gebrachten Glasplatten, von denen die eine auf der nach der Flüssigkeit hingekehrten Seite mit einer Schicht von Paraffin überzogen ist, unter Druck hindurchströmen. Die Zähigkeit setzt dem Durchgang der Flüssigkeit einen Widerstand entgegen, der mit wachsendem Abstande der begrenzenden parallelen Wände geringer wird. Trägt man also an einer Stelle ein Stück der Paraffinschicht vom Umriß des Eisenstückes beim magnetischen Versuch ab, so wird hier der Widerstand kleiner. Führt man nun in geeigneter Weise einen Farbstoff in das Glyzerin ein, so kann man erreichen, daß sich gefärbte Streifen in der Flüssigkeit bilden, die durch ihren Verlauf die Strömungsrichtung angeben und in dem Gebiete kleineren Widerstandes und seiner Umgebung ein ganz entsprechendes Bild zeigen, wie die $\mathfrak{M}$-Linien des magnetischen Feldes (s. Literatur 1). Der Grund für die Uebereinstimmung liegt in der formalen

Gleichheit der Gesetze, denen die Bewegung der Glyzerinteilchen und der Verlauf der $\mathfrak{M}$-Linien gehorcht. Den Druckdifferenzen in der strömenden Flüssigkeit entsprechen die Potentialdifferenzen im magnetischen Feld. Die Stromlinien der Flüssigkeit, d. h. Linien, welche die Richtung der Strömung angeben, haben überall die Richtung des stärksten Druckgefälles, geradeso wie die $\mathfrak{M}$-Linien die Richtung des stärksten Potentialgefälles (vgl. den Artikel „Magnetfeld" S. 585). Der Stromlinienverlauf ändert sich durch die beschriebene Widerstandsverminderung. Es liegt also nahe, die genau entsprechende Aenderung des einem Gesetz derselben Form gehorchenden $\mathfrak{M}$-Linienverlaufes ebenfalls der Verminderung einer magnetischen Widerstandsgröße zuzuschreiben und zu sagen: das Eisenstück setzt dem Durchgang der $\mathfrak{M}$-Linien einen geringeren Widerstand entgegen, es ist für die Linien durchlässiger als die Luft.

Es läßt sich leicht übersehen, daß mit der Tatsache des Zusammenlaufens der $\mathfrak{M}$-Linien die weitere verknüpft sein muß, daß die Permeabilität μ des Eisens größer ist als die der Luft.

In ein gleichförmiges Feld (Fig. 2) dessen $\mathfrak{M}$-Linien parallele, gleichweit voneinander

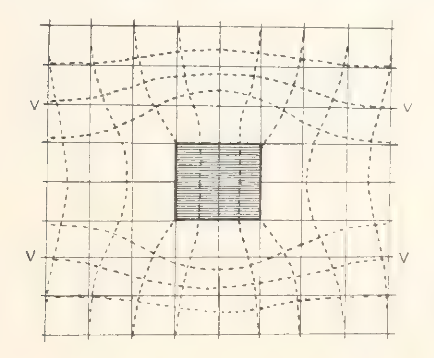


Fig. 2.

entfernte Gerade sind, und dessen Aequipotentialflächen durch vv angedeutet seien, werde ein unmagnetischer Körper (in der Figur schraffiert) gebracht, der ein Zusammenlaufen der $\mathfrak{M}$-Linien und eine entsprechende Gestaltsänderung der Aequipotentialflächen (in der Figur punktiert) hervorruft. Die Niveauflächen werden aus dem vom Körper eingenommenen Teile des Feldes hinausgedrängt, das Potentialgefälle wird also hier kleiner, während die Dichte der $\mathfrak{M}$-Linien größer ist als vorher. Da aber Potentialgefälle und $\mathfrak{M}$-Liniendichte $\mathfrak{M}$ durch die Beziehung

$$\mathfrak{M} = \mu . \mathfrak{H}$$
$$= \mu . \text{Potentialgefälle} \quad \ldots\ldots \quad 1)$$

zusammenhängen (vgl. den Artikel „Magnetfeld" S. 585), so ist eine Verkleinerung des Potentialgefälles und gleichzeitige Vergrößerung von $\mathfrak{M}$ mit einer Vergrößerung von μ verbunden.

Umgekehrt sind, wie sich in derselben Weise zeigen läßt, Verkleinerung von μ und Auseinanderweichen der $\mathfrak{M}$-Linien zusammengehörige Erscheinungen. Würde man also statt des Eisenstücks der Figur 1 einen Körper ins Feld bringen, dessen μ etwa im selben Verhältnis kleiner wäre als das der Luft, wie das μ des Eisens größer ist, so würden die Linien dem Körper ebenso deutlich ausweichen, wie sie zum Eisen hinlaufen. Da derartige Körper nicht bekannt sind, so ist die Erscheinung durch Eisenfeilicht nicht zur Anschauung zu bringen (s. 2c).

2b) Elektrisches Analogon. Die Gleichung (1) hat ihr vollkommenes Analogon auf elektrischem Gebiete.

Ist in einem Leiter der Elektrizität ein elektrisches Potentialgefälle vorhanden, so findet eine elektrische Strömung in der Richtung statt, in der das Gefälle seinen größten Wert hat, und es ist nach dem Gesetze von Ohm die Elektrizitätsmenge, welche in 1 Sekunde durch eine zur Stromrichtung senkrechte Flächeneinheit hindurchfließt, die sogenannte „Stromdichte", gegeben durch

$$\text{Stromdichte} = \lambda . \text{Potentialgefälle}, \quad . \; . \quad 2)$$

wobei λ eine Konstante des Leiters, die „elektrische Leitfähigkeit" bezeichnet.

Die formale Uebereinstimmung der Gleichungen (1) und (2) hat dazu geführt, die Größe μ als magnetische Leitfähigkeit oder Permeabilität zu bezeichnen. Die Analogie ist wertvoll für die Berechnung magnetischer Felder auf Grund der für die elektrischen Ströme geltenden Gesetze und Rechnungsregeln.

2c) Brechungsgesetz der $\mathfrak{M}$-Linien. Beim Uebergang von einem Medium zum anderen sind nach Artikel „Magnetfeld" S. 585 die in die Grenzfläche fallenden Komponenten von $\mathfrak{H}$, die sogenannten Tangentialkomponenten, zu beiden Seiten der Grenzfläche gleich groß und gleich gerichtet; ferner nach Artikel „Magnetfeld" S. 596 die Komponenten von $\mathfrak{M}$ oder $\mathfrak{B}$ nach der Senkrechten N zur Grenzfläche, die Normalkomponenten, auf beiden Seiten dieselben. Bezeichnen also μ_1 und μ_2 die Permeabilitäten der beiden aneinandergrenzenden Medien (in Figur 3 ist die Grenzfläche durch SS angedeutet), $\mathfrak{H}_1$ und $\mathfrak{H}_2$ die Feldstärken, $\mathfrak{M}_1$ und $\mathfrak{M}_2$ die Werte von $\mathfrak{M}$ in den beiden unmittelbar an der Grenze liegenden Punkten P_1 und P_2; bezeichnet ferner ein angehängtes S die Komponente nach der Grenzfläche, ein angehängtes N die Komponente nach der Senkrechten N, so gilt also

$$\mathfrak{H}_{1S} = \mathfrak{H}_{2S} \quad \ldots\ldots \quad 3)$$
$$\mathfrak{M}_{1N} = \mathfrak{M}_{2N}$$

oder

$$\mu_1 \mathfrak{H}_{1N} = \mu_2 \mathfrak{H}_{2N} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Da μ_1 und μ_2 verschieden sein sollen, so folgt aus (4) die Ungleichheit von $\mathfrak{H}_{1N}$ und $\mathfrak{H}_{2N}$. Nennt man also die Winkel, die eine $\mathfrak{H}$-Linie vor und nach ihrem Durchtritt durch die Grenzfläche mit der Senkrechten N bildet,

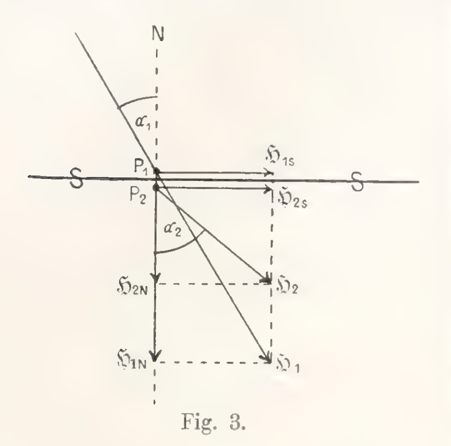


Fig. 3.

α_1 und α_2, so ersieht man aus den rechtwinkeligen Parallelogrammen der Figur 3 und aus den Gleichungen (3) und (4) die Gültigkeit der Beziehungen

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\mathfrak{H}_{1S}}{\mathfrak{H}_{1N}} \quad \operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\mathfrak{H}_{2S}}{\mathfrak{H}_{2N}}$$

$$\frac{\operatorname{tg} \alpha_1}{\operatorname{tg} \alpha_2} = \frac{\mathfrak{H}_{1S}}{\mathfrak{H}_{2S}} \cdot \frac{\mathfrak{H}_{2N}}{\mathfrak{H}_{1N}}$$

$$= \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

Dies ist das sogenannte Brechungsgesetz der $\mathfrak{H}$- und $\mathfrak{M}$-Linien — beide Liniensysteme laufen nach Artikel „Magnetfeld“ S. 597 parallel, soweit μ unveränderlich ist, was auf beiden Seiten der Grenzfläche zutrifft.[1]) Nennt man α_1 und α_2 in Analogie zur optischen Strahlenbrechung den Einfalls- und Brechungswinkel, so sagt das Gesetz aus:

I. Beim Uebergang einer $\mathfrak{H}$- oder $\mathfrak{M}$-Linie aus einem Medium 1 in ein Medium 2 verhalten sich die trigonometrischen Tangenten von Einfalls- und Brechungswinkel wie die Permeabilitäten μ_1 und μ_2 der beiden Medien.

2d) Klassifikation der Körper nach μ. Die Permeabilitäten der Körper sind sehr verschieden. Bei ihrer Vergleichung legt man die Permeabilität des leeren Raumes, des Vakuums, als Vergleichsgröße zugrunde. Sie werde mit μ_0 bezeichnet. μ_0 unterscheidet sich von der Permeabilität der Luft nur um $^7/_{100000}$ %. Man gibt also die Zahlwerte des Verhältnisses $\frac{\mu}{\mu_0}$ an und bezeichnet auch dieses Verhältnis sehr häufig einfach als Permeabilität eines Körpers (s. Literatur 2).

Das Verhältnis $\frac{\mu}{\mu_0}$ erreicht seinen größten Wert für weiches Schmiedeeisen und Stahl, und zwar etwa den Wert 3500. Für harte Eisen- und Stahlsorten geht die Zahl herunter bis zu 100 und weniger. Für Nickel schwankt sie zwischen einigen Hunderten und Werten wenig über 1; für Kobalt zwischen 16 und 2. Diese Körper: Eisen (Stahl), Nickel, Kobalt, aus denen sich Magnete herstellen lassen, heißen ferromagnetische. Sie unterscheiden sich von allen anderen Körpern durch die Größe ihrer Permeabilität und dadurch, daß diese nicht unveränderlich, sondern von der Feldstärke $\mathfrak{H}$ und anderen Faktoren abhängig ist (s. 4).[1]) Für alle anderen Körper ist die Permeabilität nur um äußerst wenig größer oder kleiner als für das Vakuum, und bis auf geringe, nicht ganz sicher gestellte Abweichungen konstant. Das Vakuum ist also nicht der schlechteste magnetische Leiter. Für Eisenchloridlösung, die von allen nicht ferromagnetischen Körpern das größte μ besitzt, ist $\frac{\mu}{\mu_0}$ ungefähr gleich 1,0006; für Wismut, den schlechtesten magnetischen Leiter, etwa 0,99982, also um etwa $^2/_{100}$ % kleiner als für das Vakuum.

Man nennt die Körper, deren μ größer ist als das des Vakuums (also $\frac{\mu}{\mu_0}$ größer als 1), paramagnetische, die, bei denen es kleiner ist ($\frac{\mu}{\mu_0}$ kleiner als 1), diamagnetische. Körper, welche die $\mathfrak{M}$-Linien überhaupt nicht durchlassen, entsprechend den vollkommenen Isolatoren auf elektrischem Gebiete, gibt es nicht.

2e) Vergleichung von μ-Werten. Nach Gleichung (1) erhält man das Verhältnis der μ zweier Körper, indem man in beiden dasselbe magnetische Feld hervorruft und die dabei vorhandenen Werte von $\mathfrak{M}$ mittels der Induktionsmethode (vgl. den Artikel „Magnetfeld“ S. 594f.) vergleicht. So lassen sich noch Permeabilitäten wie die von Eisenchlorid messen;

[1]) Zum mindesten für hinreichend kleine Gebiete beiderseits der Grenze, falls die beiden aneinandergrenzenden Körper nicht überall dasselbe μ besitzen.

[1]) Zu ihnen sind auch noch einige Legierungen, die sogenannten Heuslerschen Manganlegierungen, zu rechnen.

für die kleineren bedarf es einer verfeinerten Methode, die sich aus der Untersuchung der magnetischen Kräfte des Feldes ergibt (s. 8 c).

Nach dem Brechungsgesetz der $\mathfrak{M}$-Linien (2cI) werden bei sehr verschiedenen μ-Werten der aneinandergrenzenden Körper auch die Winkel α sehr ungleich groß. Beim Uebergang der Linien aus Eisen in Luft z. B. wird der Winkel in Luft auch bei großem Winkel im Eisen klein werden, d. h. die Linien treten meist nahezu senkrecht aus dem Eisen aus, bezw. in dasselbe ein. Die Eisenfeilbilder lassen dies deutlich erkennen.

2f) Da es keine Körper der Permeabilität o, d. h. keine magnetischen Isolatoren gibt, so lassen sich die $\mathfrak{M}$-Linien nicht in dem Maße in bestimmte Bahnen eindämmen, wie dies bei den elektrischen Strömen möglich ist. Bis zu einem gewissen Grade aber gelingt es auch hier, wie Figur 4

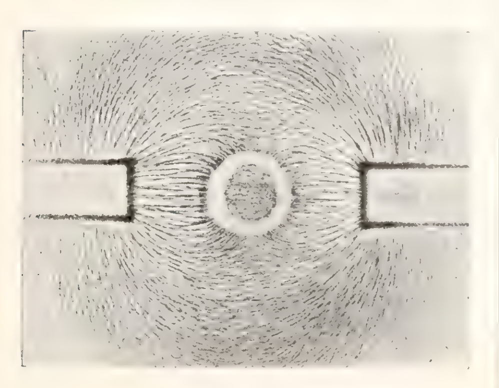


Fig. 4.

zeigt. In das Feld zweier entgegengesetzter Pole (vgl. den Artikel „Magnetfeld" Fig. 10) ist ein Ring aus Eisen (äußerer Durchmesser etwa 4,4 cm, innerer 2,4 cm; rechteckiger Querschnitt) gebracht. Die $\mathfrak{M}$-Linien drängen sich in den Ring hinein und verlaufen im Eisen, ohne in die Luft des Ringinnenraumes auszutreten; die Feilspäne bleiben hier ungeordnet. Tatsächlich ist aber auch hier ein schwaches magnetisches Feld vorhanden, das mit feineren Hilfsmitteln nachweisbar ist. Die theoretische Berechnung ergibt folgendes. Ist $\mathfrak{H}_0$ der ursprüngliche Feldwert am Orte des Ringes, μ_0 die Permeabilität des Mediums, das das Feld erfüllt — in unserem Falle Luft — μ die Permeabilität des Eisens, r_1 und r_2 der innere und äußere Radius des Ringes, so gilt für das Feld $\mathfrak{H}$ im Innenraume des Ringes angenähert[1])

$$\frac{H}{H_0} = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{\left(\frac{\mu}{\mu_0} - 1\right)^2 \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right]}{\frac{\mu}{\mu_0}}}$$

[1]) In Strenge gilt die Formel nicht für einen Ring, sondern für einen langen hohlen Zylinder von derselben Wandstärke und denselben Radien wie der Ring.

Die Schwächung des Feldes hängt also ab von dem Verhältnis $\frac{\mu}{\mu_0}$ und von dem Verhältnis der Radien $\frac{r_1}{r_2}$. Sie bleibt dieselbe, wenn sich alle Dimensionen des Ringes in gleichem Verhältnis ändern. Für unseren Ring ist, seine Permeabilität 1000mal so groß als die der Luft angenommen, ungefähr

$$\frac{H}{H_0} = \frac{1}{200}.$$

3. Die magnetischen Mengen und die Magnetisierung. 3a) Zusammenhang zwischen wahren, freien und induzierten Mengen. Es handelt sich jetzt darum, den Zusammenhang zwischen den als Endpunkte der $\mathfrak{M}$-Linien definierten wahren magnetischen Mengen und den Mengen $\mathfrak{m}$ festzustellen, die im Artikel „Magnetfeld" S. 581 durch das Coulombche Gesetz Gleichung (1) eingeführt werden. Die wahren Mengen sollen das Zeichen $\mathfrak{m}_0$ erhalten.

In einem Punkte P des Feldes, wo die Permeabilität μ ist, befinde sich die wahre magnetische Menge $\mathfrak{m}_0$. Es enden also in P $\mathfrak{m}_0$ $\mathfrak{M}$-Linien. Die Feldstärke $\mathfrak{H}$ in der Nähe des Punktes ist gleich dem Werte des Vektors $\mathfrak{M}$ dividiert durch μ (Gleichung (1)), also $\mathfrak{H} = \frac{\mathfrak{M}}{\mu}$; der Punkt P ist also Endpunkt von $\frac{\mathfrak{m}_0}{\mu}$ $\mathfrak{H}$-Linien.

Andererseits gehen nach Artikel „Magnetfeld", Gleichung (2), von einem Punkte, in dem sich die magnetische Menge $\mathfrak{m}$ befindet, $4\pi l.\mathfrak{m}$ $\mathfrak{H}$-Linien aus, oder wo 1 $\mathfrak{H}$-Linie endet, liegt die Menge $\frac{1}{4\pi l}$.

Am Ort der wahren Menge $\mathfrak{m}_0$, von wo $\frac{\mathfrak{m}_0}{\mu}$ $\mathfrak{H}$-Linien ausgehen, liegt also die Menge

$$\mathfrak{m} = \frac{\mathfrak{m}_0}{\mu} \cdot \frac{1}{4\pi l} \quad \ldots\ldots \quad 6)$$

Dies ist der Zusammenhang der wahren Mengen $\mathfrak{m}_0$ und der Mengen $\mathfrak{m}$, die man nach H. Hertz als freie Mengen bezeichnet. Beiderlei Mengen werden identisch, wenn $4\pi l.\mu = 1$ wird. Nun setzt das absolute Maßsystem $l = 1$ (vgl. den Artikel „Magnetfeld" S. 581) und ferner $4\pi\mu_0 = 1$, wo μ_0 die Permeabilität des Vakuums ist. Im Vakuum werden also wahre und freie Mengen in absolutem Maße einander gleich. Wird das Vakuum durch ein paramagnetisches Medium ersetzt, so sind nach Gleichung (6) die freien Mengen kleiner als die wahren, und umgekehrt in einem diamagnetischen Medium größer als

die wahren. Die Differenz der freien und wahren Menge eines Punktes nennt man die induzierte oder influenzierte Menge in dem Punkte. Sie werde mit $\mathfrak{m}'$ bezeichnet, so daß also

$$\mathfrak{m} - \mathfrak{m}_0 = \mathfrak{m}'$$

oder

$$\mathfrak{m}_0 + \mathfrak{m}' = \mathfrak{m}. \quad \ldots \ldots \quad 7)$$

Wo also wahre Mengen fehlen (überall außerhalb der permanenten Magnete, vgl. den Artikel „Magnetfeld“ S. 598), sind freie und induzierte Mengen identisch. Das Auftreten der induzierten oder influenzierten Mengen bezeichnet man als magnetische Influenz.

Man gelangt zu Resultaten, die durch die Erfahrung durchaus bestätigt werden, wenn man annimmt, daß wahre, freie und induzierte Mengen gleicher Größe im selben Felde gleiche Kraftwirkung erfahren und ebenso ihrerseits gleiche Kraftwirkung (nach dem Coulombschen Gesetze vgl. den Artikel „Magnetfeld“ 2d) ausüben.

Es ist also, um zusammenzufassen, wenn das Feld in absolutem Maße gemessen wird, die

Am Endpunkt einer $\mathfrak{H}$-Linie liegt die freie (oder induzierte) Menge $\mathfrak{m}\ (\mathfrak{m}') = \frac{1}{4\pi}$ oder da $4\pi\mu_0 = 1$ ist, die freie (induzierte) Menge

$$\mathfrak{m}\ (\mathfrak{m}') = \mu_0. \quad \ldots \ldots \ldots \quad 8)$$

3b) Feld von überall gleichem und Feld von veränderlichem μ. Feldberechnung. Befinden sich wahre magnetische Mengen $\mathfrak{m}_0$ in einem Medium von überall gleicher Permeabilität μ, z. B. in Luft, so haben nach dem Artikel „Magnetfeld“ S. 596f. die $\mathfrak{H}$-Linien Endpunkte nur in diesen Mengen $\mathfrak{m}_0$; durch den ganzen übrigen Raum ziehen sie sich fortlaufend hindurch und sind in Bündel oder Röhren abteilbar, für die der Satz von der Erhaltung des $\mathfrak{H}$-Linienflusses gilt. Wird aber in das Feld ein unmagnetischer Körper von anderem μ gebracht, z. B. ein Stück Eisen, so enden nach dem Artikel „Magnetfeld“ (S. 597) in seiner Grenzfläche — und wenn der Körper inhomogen ist, d. h. aus Teilen von verschiedenem μ besteht, auch in seinem Innern — einzelne $\mathfrak{H}$-Linien. In jedem solchem Endpunkt liegt nach Gleichung (8) die freie Menge μ_0. Da eine wahre Menge hier nicht vorhanden ist, so wird die freie Menge gleich der induzierten.

Sei z. B. in Figur 1 der Magnetpol links ein Nordpol, der rechts ein Südpol, so entspringen die $\mathfrak{H}$-Linien von dem Stabe links und laufen

wahre	Menge	$\mathfrak{m}_0$	Endpunkt	von	$\mathfrak{m}_0$	$\mathfrak{M}$-Linien
„	„	„	„	„	$\frac{\mathfrak{m}_0}{\mu}$	$\mathfrak{H}$- „
freie	„	$\mathfrak{m}$	„	„	$4\pi\mu.\mathfrak{m}$	$\mathfrak{M}$- „
„	„	„	„	„	$4\pi.\mathfrak{m}$	$\mathfrak{H}$- „
induzierte	„	$\mathfrak{m}'$	„	„	0	$\mathfrak{M}$- „
„	„	„	„	„	$4\pi.\mathfrak{m}'$	$\mathfrak{H}$- „ .

nach dem Südpol rechts zu. Ein Teil der dabei auf das Eisenstück treffenden Linien mündet in der linken Hälfte von dessen Oberfläche. Hier liegen also induzierte südmagnetische Mengen. Genau so viele $\mathfrak{H}$-Linien müssen aber in der rechten Oberflächenhälfte wieder entspringen.[1] Denn da die $\mathfrak{M}$-Linien in dem (unmagnetischen) Stück Eisen keine Endpunkte haben, so müssen alle links in das Eisen hineintretenden $\mathfrak{M}$-Linien auch rechts wieder heraustreten, es müssen also auch die Gesamtzahlen der $\mathfrak{H}$-Linien, die links auf die Eisenoberfläche auftreffen und die rechts von ihr ausgehen, und die aus der Gesamtzahl der $\mathfrak{M}$-Linien durch Division in die Permeabilität der Luft erhalten werden, einander gleich sein. Es befindet sich also auf der rechten Oberflächenhälfte des Eisenstücks dieselbe Gesamtmenge von induziertem Nordmagnetismus, wie von Südmagnetismus auf der linken.

Ist der Feldraum von beliebigen Körpern erfüllt, deren Permeabilität nicht durchweg gleich der des Vakuums ist, so sind also außer den wahren magnetischen Mengen noch induzierte vorhanden. Die wahren Mengen allein sind bereits vollkommen bestimmend für das Feld, d. h. den Verlauf der $\mathfrak{H}$- oder $\mathfrak{M}$-Linien, und damit auch für die induzierten Mengen. Die wirkliche Feldberechnung aber erfolgt aus den freien, d. h. wahren und induzierten Mengen zusammen nach dem Coulombschen Gesetz (vgl. den Artikel „Magnetfeld“ Gleichung (1)).

Um aus den gesamten magnetischen Mengen eines vorliegenden Feldes die wahren auszuscheiden, denke man sich die Permeabilität aller Körper in die des Vakuums übergehen. Dann verschwindet eine Anzahl Endpunkte von $\mathfrak{H}$-Linien. Die Zahl der übrigbleibenden gibt dividiert durch 4π den Gesamtbetrag der wahren Mengen in absolutem Maße.

3c) Berechnung der induzierten Mengen. Es folge hier noch ein Beispiel der Berechnung induzierter Mengen. Ein im Vakuum verlaufendes Bündel von $\mathfrak{M}$-Linien (Fig. 5) treffe auf die Oberfläche SS etwa eines unmagnetischen Eisenstücks. Die Permeabilität des Vakuums ist gleich μ_0, die des Eisens sei μ. q_0 sei der Bündelquerschnitt im Vakuum, q im Eisen. Bezeichnet noch H_0 den Wert der Feldstärke an der Grenze im Vakuum, H im Eisen, so gilt

[1]) Vorausgesetzt, daß das Eisenstück homogen ist, sonst liegen auch Mündungs- und Ursprungspunkte im Innern, aber immer in gleicher Zahl.

nach dem Satze von der Erhaltung des $\mathfrak{M}$-Linienflusses (I)

$$\mu_0 H_0 q_0 = \mu H q.$$

Die Zahl Z der Endpunkte von $\mathfrak{H}$-Linien, die in der Grenzfläche liegen, ist gleich dem

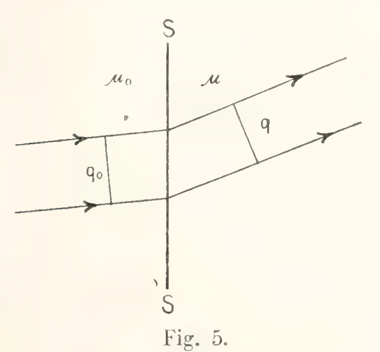


Fig. 5.

Unterschiede der Anzahl von $\mathfrak{H}$-Linien, die durch den Querschnitt q_0 und durch den Querschnitt q hindurchgehen, also nach bekannten Sätzen der Proportionslehre

$$Z = H_0 q_0 - H q$$
$$= \frac{\mu - \mu_0}{\mu_0} . H . q.$$

Den Betrag der induzierten Menge $\mathfrak{m}'$ erhält man hieraus durch Multiplikation mit μ_0 (nach Gleichung (8)). Ist μ größer als μ_0, so ist Z positiv, d. h. es gehen durch q_0 mehr Linien als durch q. Laufen die Linien im Sinne der Pfeile, so münden also in der Grenze Linien, es liegen hier induzierte südmagnetische Mengen. Die nord- und südmagnetischen Mengen mögen durch die Zeichen + und — unterschieden werden. Dann ist also für den Fall unserer Figur:

$$\mathfrak{m}' = -(\mu - \mu_0) . H . q. \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9)$$

Auf einem bestimmten Flächenstück liegt danach eine um so größere induzierte Menge, je mehr sich das μ des Eisens von dem des Vakuums unterscheidet, je größer die Feldstärke H und je größer der Querschnitt q des Bündels im Eisen ist. Dieser aber hängt bei bestimmtem μ nur vom Einfallswinkel des Linienbündels ab. Er wird am größten ($= q_0$), wenn das Bündel senkrecht auftritt; null, wenn der Brechungswinkel gleich 90° wird. Die induzierte Menge wird also um so größer, je steiler das Bündel einfällt.

3d) In dem Artikel „Magnetfeld" S. 587 sind Magnetisierungslinien definiert, die in den freien magnetischen Mengen endigen. Man kann sie Linien der freien Magnetisierung $\mathfrak{J}$ nennen. Sie gehen, sobald die Permeabilität des ganzen Feldraumes μ_0 wird, in die Linien der im Artikel „Magnetfeld" S. 597f. eingeführten wahren Magnetisierung $\mathfrak{J}_0$ über, geradeso wie die freien in die wahren Mengen. Man hat nun auch den induzierten Mengen entsprechende Linien der induzierten Magnetisierung $\mathfrak{J}'$ eingeführt mit der Bestimmung, daß an der Stelle der induzierten südmagnetischen Menge 1 eine Linie der induzierten Magnetisierung $\mathfrak{J}'$ entspringen und an der Stelle der induzierten nordmagnetischen Menge 1 eine solche Linie münden soll. Physikalisch unterscheiden sich wahre und induzierte Magnetisierung nur dadurch, daß diese bloß unter der Einwirkung eines magnetischen Feldes besteht, jene auch ohne Feld. In den Magneten setzt sich die Magnetisierung im allgemeinen aus wahrer und induzierter zusammen, ist also freie Magnetisierung

$$\mathfrak{J} = \mathfrak{J}_0 + \mathfrak{J}' \text{ (s. 3a Gleichung (7)).}$$

Die induzierte Menge $\mathfrak{m}'$ der Gleichung (9) soll also gleich sein der Zahl der Endpunkte von $\mathfrak{J}'$-Linien auf dem Flächenstück, das vom $\mathfrak{M}$-Linienbündel mit dem Querschnitt q (Fig. 5) aus der Grenzfläche SS herausgeschnitten wird. Die einfachste Annahme über die induzierte Magnetisierung $\mathfrak{J}'$ ist also die: sie ist parallel zu $\mathfrak{H}$ und gegeben durch

$$\mathfrak{J}' = (\mu - \mu_0)\mathfrak{H} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (10)$$

so daß durch den Querschnitt q des Bündels $(\mu - \mu_0)$ H.q Linien hindurchtreten und in der Grenzfläche SS endigen.[1]) Dazu gehört noch die Festsetzung, daß ein positiver Wert von $\mathfrak{J}'$ bedeuten soll, daß die $\mathfrak{J}'$-Linien im selben Sinne laufen wie die $\mathfrak{H}$-Linien, ein negativer dagegen ein Laufen im entgegengesetzten Sinne. Denn ist μ größer als μ_0, so wird $\mathfrak{m}'$ nach Gleichung (9) negativ, d. h. südmagnetisch, $\mathfrak{J}'$ positiv, und die $\mathfrak{J}'$-Linien entspringen in der Grenzfläche und laufen im Sinne von $\mathfrak{H}$. Umgekehrt ist es, wenn μ kleiner als μ_0.

Die Gleichung (10) läßt sich auch so schreiben

$$\mathfrak{J}' = 4\pi\mu_0 . \frac{\mu - \mu_0}{4\pi\mu_0} . \mathfrak{H}$$
$$= 4\pi\mu_0 . \varkappa . \mathfrak{H} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

Die Größe

$$\varkappa = \frac{\mu - \mu_0}{4\pi\mu_0} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

heißt die Suszeptibilität des Körpers von der Permeabilität μ. Sie ist positiv für paramagnetische, negativ für diamagnetische Körper.

Die Permeabilität μ setzt sich also aus zwei Bestandteilen zusammen

$$\mu = \mu_0 + 4\pi\mu_0 . \varkappa,$$

und dementsprechend der Vektor $\mathfrak{M}$ aus zwei Vektoren

$$\mathfrak{M} = \mu \mathfrak{H}$$
$$= \mu_0 \mathfrak{H} + 4\pi\mu_0 . \varkappa . \mathfrak{H}$$
$$= \mu_0 \mathfrak{H} + \mathfrak{J}' \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

[1]) $\mathfrak{J}'$ hängt nur von dem Felde $\mathfrak{H}$ im magnetisierten Körper und von dessen μ ab, ist also bei gleichem $\mathfrak{H}$ dasselbe, mag der Körper wie hier an das Vakuum oder an einen beliebigen anderen Körper angrenzen.

Das $\mathfrak{M}$-Linienbild des Feldes entsteht also durch Zusammensetzung des Bildes, das bei unveränderter Feldstärke im Vakuum vorhanden wäre, mit dem Bilde der $\mathfrak{J}'$-Linien, die überall vorhanden sind, wo μ von μ_0 verschieden ist.

3e) Unterschied zwischen Para- und Diamagnetismus. Nach Gleichung (10) scheint ein prinzipieller Unterschied zwischen para- und diamagnetischen Körpern zu bestehen. In jenen ist die induzierte Magnetisierung gleichgerichtet mit der magnetisierenden Feldstärke, in diesen entgegengesetzt. Der Unterschied ist aber bedingt durch die Wahl des Vakuums als Vergleichsmedium. Da seine Permeabilität μ_0 nicht die kleinste ist (2d), so sind die μ der anderen Körper teils größer teils kleiner, die Suszeptibilitäten $\varkappa$ und damit die induzierten Magnetisierungen $\mathfrak{J}'$ nach Gleichung (11) und (12) teils positiv, teils negativ. Das Vakuum erscheint als das überhaupt nicht magnetisierbare Medium, da sein $\varkappa$ gleich 0 ist; die freien magnetischen Mengen im Vakuum sind die wahren. Würde man statt dessen als Vergleichspermeabilität μ_0 die kleinste bekannte wählen, als wahre Mengen das, was aus den freien Mengen bei Verwandlung der verschiedenen μ des Feldraumes in diese kleinste Permeabilität μ_0 wird, so würden alle μ größer als μ_0, alle $\varkappa$ und $\mathfrak{J}'$ positiv, d. h. gleichgerichtet mit $\mathfrak{H}$. Es verhält sich wie mit den Temperaturen. Bezieht man diese auf den Schmelzpunkt des Eises, so werden sie teils positiv teils negativ, ohne daß ein Wesensunterschied zwischen „Wärme“- und „Kälte“graden anzunehmen wäre; bezieht man sie auf die niedrigste Temperatur, den absoluten Nullpunkt, so gibt es nur „Wärme“grade.

Stellt man sich also auch das Vakuum als magnetisierbares Medium vor, überhaupt alle Medien als magnetisierbar in der Weise, daß die $\mathfrak{J}'$-Linien im selben Sinne laufen wie die $\mathfrak{H}$-Linien, so unterscheiden sich die verschiedenen Medien nur durch die Dichte, mit der die $\mathfrak{J}'$-Linien

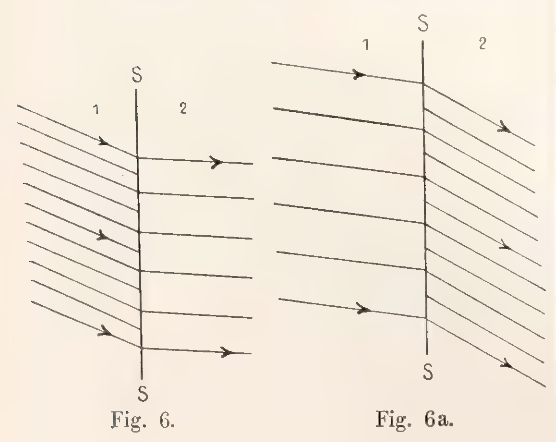


Fig. 6. Fig. 6a.

bei derselben Feldstärke auftreten. Die Dichte wächst stetig, wenn man vom Wismut zu den schwächer diamagnetischen Körpern und zum Vakuum, von diesem weiter zu stärker und stärker paramagnetischen bis zum Eisen geht.

Deutet also in Figur 6 SS die Grenzfläche zwischen dem Vakuum 1 und einem diamagnetischen Körper 2 an, und laufen $\mathfrak{H}$- und $\mathfrak{J}'$-Linien im Sinne der Pfeile, so kommt das von der Gleichung (9) geforderte Auftreten positiver, d. h. nordmagnetischer induzierter Mengen $\mathfrak{m}'$ in der Grenzfläche dadurch zustande, daß die $\mathfrak{J}'$-Linien im Vakuum dichter sind, als in dem Diamagnetikum. In der Grenzfläche münden also Linien und liefern die nordmagnetischen $\mathfrak{m}'$.

Ist dagegen 1 das Vakuum und 2 paramagnetisch (Fig. 6a), so ist die Liniendichte in 2 größer, und die in SS liegenden Quellpunkte von Linien stellen die der Gleichung (9) Genüge leistenden südmagnetischen $\mathfrak{m}'$ dar.

3f) Feld im Innern fester Körper. Die Anschauung, daß jeder im magnetischen Feld befindliche feste Körper von induzierten oder freien Magnetisierungslinien durchzogen ist, führt zu der Vorstellungsmöglichkeit einer Untersuchung der Feldstärke $\mathfrak{H}$ im Innern. Wollte man diese Untersuchung so ausführen, daß man eine kleine Magnetnadel (vgl. Artikel „Magnetfeld“, 1d) in eine entsprechende Höhlung des festen Körpers brächte, so würde das Feld am Orte der Nadel völlig verschieden sein von dem vorher an derselben Stelle in der massiven Körpersubstanz vorhandenen. Die Veränderung rührt her von den induzierten magnetischen Mengen, die an der Wand der Höhlung auftreten. Denkt man sich dagegen einen engen, von Magnetisierungslinien umgrenzten Kanal (Fig. 7) durch den Körper hindurchgebohrt — gewissermaßen ein dünnes Bündel von Magnetisierungslinien samt der davon durchsetzten Materie herausgezogen — so treten an den Wänden dieses Kanals keine induzierten Mengen

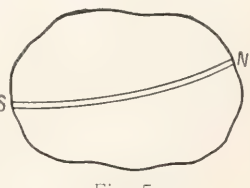


Fig. 7.

auf, da die $\mathfrak{J}'$- und damit die $\mathfrak{H}$-Linien zu den Wänden parallel laufen (vgl. 3c). Handelt es sich um einen magnetischen Körper, d. h. einen von freien Magnetisierungslinien durchzogenen, so können diese nach Artikel „Magnetfeld“ 4c ohne Feldänderung so gelegt werden, daß sie mit den $\mathfrak{J}'$- und $\mathfrak{H}$-Linien parallel laufen. Der längs des $\mathfrak{J}$-Linienbündels ausgebohrte Kanal durchschneidet also auch hier keine $\mathfrak{H}$-Linien. Die einzige durch den Kanal verursachte Feldänderung besteht darin, daß die Wirkung der magnetischen Mengen N und S an den Enden des herausgenommenen Bündels fortfällt. Ist aber das Bündel äußerst dünn, so ist diese Wirkung namentlich für den mittleren Teil des Kanals verschwindend und kann unberücksichtigt bleiben. Bis auf diesen kleinen Fehler stimmt also die im Kanal mit einer kleinen Magnetnadel gemessene Feldstärke $\mathfrak{H}$ mit der überein, die vor Ausbohren des Kanals am Ort der Messung vorhanden war.

3g) Molekulartheorie des Magnetismus. Nur kurz angedeutet können hier die Vorstellungen werden, die man sich von den physikalischen mit der Magnetisierung verbundenen Vorgängen im Innern der Körper gebildet hat.

Die Tatsache, daß jeder noch so kleine Bruchteil eines Magneten sich als vollständiger Magnet erweist, hat zu der Vorstellung der sogenannten Molekularmagnete geführt. Danach sind die Moleküle aller Körper mehr oder weniger starke Magnete, deren Wirkung nach außen aber durch die im allgemeinen vorhandene Regellosigkeit der Anordnung verschwindet. Die Magnetisierung besteht in einer Richtung dieser Molekularmagnete. Die vorhandenen Theorien unterscheiden sich wesentlich nur in zwei Punkten. Der erste Punkt ist die Annahme, die zur Erklärung der Tatsache gemacht wird, daß nicht jede magnetisierende Kraft sofort alle Molekularmagnete vollständig in ihre eigene Richtung dreht, sondern daß die Moleküle den richtenden Kräften einen gewissen Widerstand entgegensetzen. Der zweite Punkt ist die Annahme, die über die Natur des Molekularmagnetismus gemacht wird.

Den neueren Theorien von Ewing (s. Literatur 3) und Weiß (s. Literatur 4) gemeinsam ist die Vorstellung, daß die Moleküle auch eines unmagnetischen Körpers nicht völlig regellos, sondern in kleinen Gruppen parallel gestellt sind, daß sich aber in hinreichender Nähe einer jeden Gruppe eine andere von entgegengesetzter magnetischer Achsenrichtung befindet, so daß eine magnetische Wirkung nach außen nicht ausgeübt wird. Nach Ewing wirken nun die Kräfte zwischen den Molekularpolen der Richtkraft eines magnetisierenden Feldes entgegen. Die besondere Molekülanordnung hat zur Folge, daß in schwachen Feldern nur geringe und beim Verschwinden des Feldes wieder zurückgehende Ablenkungen der Moleküle stattfinden, von einer gewissen Feldstärke an aber ein Umschlagen einzelner Molekülgruppen erfolgt. Sind alle Moleküle mit ihrer magnetischen Achse zum Felde parallel gerichtet, so hat man gesättigte Magnetisierung; auch das stärkste Feld vermag sie nicht mehr zu vergrößern.

Die Theorie von Weiß beruht auf der Annahme, daß die Wärmebewegung der Moleküle und ihre fortwährenden Zusammenstöße einer Gleichrichtung entgegenwirken, und zwar um so mehr, je höher die Temperatur ist. Die Magnetisierung hängt also von der Feldstärke $\mathfrak{H}$ und von der Temperatur ab. Die mathematische Behandlung des Problems hat Langevin (s. Literatur 5) auf Grund der Boltzmannschen Gastheorie für ein magnetisches Gas durchgeführt. Die Resultate erweisen sich gültig auch für alle Flüssigkeiten und nicht ferromagnetischen festen Körper. Für ferromagnetische Körper hat Weiß (s. Literatur 6) die Theorie dadurch erweitert, daß er hier noch eine gegenseitige magnetische Beeinflussung der Moleküle annimmt, ein sogenanntes „molekulares Feld“, dessen Stärke an jeder Stelle einfach in direktem Verhältnis zu der Größe der Magnetisierung steht. Durch diese einfache Annahme gelangt Weiß einerseits zu einer recht befriedigenden theoretischen Darstellung der Beobachtungen an ferromagnetischen Körpern, andererseits eröffnet seine Theorie wichtige Einblicke in die Natur der Molekularmagnete.

Eine konsequente theoretische Durchführung der von Ewing mehr qualitativ ausgesprochenen Ideen mit Benutzung der Weißschen Resultate bilden die Arbeiten von Gans (s. Literatur 7). Sie führen zu einer molekulartheoretischen Erklärung der Hysteresiserscheinungen (vgl. unter 4 und den Artikel „Magnetische Eigenschaften der Stoffe“).

Was die Natur der Molekularmagnete betrifft, so kann man sich die Moleküle entweder als permanente Magnete vorstellen oder nach Ampère als Träger von Strombahnen, die keinen Widerstand besitzen, in denen also Elektrizität ohne Energieverlust strömen und ein einmal eingeleiteter Strom dauernd ohne Energiezufuhr bestehen bleiben kann. Nach der in den letzten Jahrzehnten ausgebildeten Elektronentheorie sind es unwägbare, mit bestimmten Elektrizitätseinheiten geladene Teilchen, die Elektronen, welche die Molekularströme zustande bringen, indem sie planetenartig um feste Zentren in den Molekülen kreisen. In den paramagnetischen Körpern sind die Elektronenbahnen derart angeordnet, daß das Molekül sich verhält wie ein kleines Solenoid (vgl. den Artikel „Magnetfeld“ S. 593), in den diamagnetischen dagegen so, daß das Molekül unmagnetisch erscheint. Wird der Körper in ein Magnetfeld gebracht, so kommen zu den schon vorhandenen Strömen induzierte hinzu. Bei den paramagnetischen Substanzen werden diese induzierten Ströme von den stärkeren Dauerströmen verdeckt, und die Moleküle richten sich mit ihren magnetischen Achsen so, daß an der Eintrittsstelle der $\mathfrak{M}$-Linien in den Körper Südmagnetismus entsteht. Dagegen entsteht hier bei den diamagnetischen Körpern nach dem Induktionsgesetz Nordmagnetismus und eine Richtung der Moleküle findet wegen der Schwäche der Richtkraft nicht statt, so daß nach dieser Theorie die Magnetisierung in para- und diamagnetischen Körpern tatsächlich im selben Felde entgegengesetzte Richtung hat (vgl. S. 672). Bei jenen besteht die Magnetisierung in einer Richtung der Moleküle, bei diesen in der Hervorrufung induzierter Ströme. W. Voigt (s. Literatur 8) hat theoretisch untersucht, inwieweit und unter welchen Bedingungen sich diese beiden verschiedenen Er-

klärungen durch eine einzige, einheitliche, auf die bloße Bewegungsänderung der Elektronen im Magnetfeld gegründete, ersetzen lassen.

4. **Das Superpositionsprinzip.** Das Superpositionsprinzip für den Fall der magnetischen Ungleichartigkeit der Körper im Felde. Bringt man in das etwa von Luft erfüllte Feld eines Magneten M_1 einen zweiten Magneten M_2, so wird der magnetische Widerstand, der sich den $\mathfrak{M}$-Linien des Magneten M_1 darbietet, in dem von M_2 eingenommenen Raume ein anderer; der Verlauf der Linien ändert sich also, das Feld von M_1 bleibt nicht dasselbe. Ebenso nimmt das $\mathfrak{M}$-Linienbild von M_2 durch die Anwesenheit von M_1 ein anderes Aussehen an, als es vorher hatte, wo M_2 für sich allein war. Man kann also über das Aussehen des resultierenden Gesamtfeldes aus der Gestaltung der beiden getrennten Einzelfelder gar nichts aussagen; man muß dazu die μ-Werte der beiden Magnete kennen.

Sind also die Permeabilitäten der Körper im Feldraume beliebig, so gilt das Superpositionsprinzip in der Form, in der es im Artikel „Magnetfeld" S. 586 ausgesprochen wurde, nicht mehr. Dagegen nimmt es, wie leicht zu übersehen, folgende Form an.

Eine Anordnung von Magneten und Strömen rufe in beliebiger Umgebung ein Feld $\mathfrak{H}_1$ hervor, eine zweite Anordnung in anderer Umgebung ein Feld $\mathfrak{H}_2$. Ist es dann möglich, die beiden Felder mit den darin befindlichen Körpern so zusammenzulegen, daß dabei für keines der beiden Felder an irgendeiner Stelle des Feldraumes die Permeabilität eine andere wird, als sie es vor dem Zusammenlegen war, d. h. findet jeder Körper des einzelnen Feldes in dem Raume des fremden Feldes, den er durch das Zusammenlegen einnimmt, bereits die Permeabilität vor, die er selber besitzt, so superponieren sich die beiden Felder $\mathfrak{H}_1$ und $\mathfrak{H}_2$ in unveränderter Gestalt einfach nach den bekannten Regeln.

Wenn aber auch die Permeabilitätsverteilung in den beiden getrennten Feldern derart ist, daß ihr Zusammenlegen unter der eben angegebenen Bedingung möglich wäre, so muß doch noch vorausgesetzt werden, daß die Permeabilitäten sich durch das Zusammenlegen nicht verändern, daß sie also vor allem nicht veränderlich sind mit der Feldstärke $\mathfrak{H}$.

Dies trifft nun keineswegs für die ferromagnetischen Körper zu. Hier ist μ keine Konstante, sondern stark veränderlich mit dem Feld. Die Abhängigkeit vom Feld läßt sich auch nicht in einfacher und allgemeingültiger Weise angeben; vielmehr hat μ nicht einmal für eine bestimmte Feldstärke $\mathfrak{H}$ immer denselben Wert, sondern dieser hängt ab von den magnetischen Einwirkungen, denen das Metall vorher unterworfen war (Erscheinungen der „Hysteresis"). Hier verliert also jedes Superpositionsprinzip seine Gültigkeit.

In der Veränderlichkeit der Permeabilität und in dem Vorhandensein der Hysteresis liegt die größte Schwierigkeit einer vollständigen Theorie der magnetischen Erscheinungen.

5. **Die Stromfelder.** 5a) Die Gleichwertigkeit von Doppelschicht und linearem Strom besteht ganz allgemein. Alle im Artikel „Magnetfeld" unter 5 aufgestellten Sätze für Stromfelder beruhen auf der Gleichwertigkeit eines einfachen Stromkreises mit einer sogenannten magnetischen Doppelschicht.

Die Uebereinstimmung der Felder beider ist durch Versuche an Stromkreisen in Luft festgestellt (vgl. den Artikel „Magnetfeld" 5b). Die Gleichwertigkeit bleibt aber auch bestehen, wenn die Permeabilität der Umgebung sich beliebig verändert.

Es mögen also ein Stromkreis und die in Luft damit gleichwertige Doppelschicht an Stelle der Luft mit einem Medium der Permeabilität μ umgeben werden.

Dadurch ändert sich das Feld der Doppelschicht nicht, sofern sie äußerst dünn ist, weil dann die induzierenden Wirkungen ihrer nord- und südmagnetischen Mengen auf das umgebende Medium sich gegenseitig aufheben.

Im Falle des Stromkreises denke man sich zunächst nur im Innern eines Bündels oder einer Röhre von $\mathfrak{H}$-Linien die Permeabilität der Luft in die Permeabilität μ verwandelt. Dann ändert sich das Feld nicht. Denn jede Feldänderung läßt sich in der Weise auffassen, daß zu dem ursprünglichen Feld ein neues hinzukommt, das sich damit nach dem Parallelogrammgesetz zu dem veränderten Felde zusammensetzt. In unserem Falle aber sind keine Quellen für ein solches neu hinzukommendes Feld vorhanden, weder neue Ströme noch magnetische Mengen, da die $\mathfrak{M}$-Linien an der Oberfläche des ringartigen Körpers von der Permeabilität μ tangential verlaufen und also keine induzierten Mengen entstehen lassen (3c). Dasselbe gilt für alle $\mathfrak{H}$-Linienbündel des Feldes; es ändert sich das Feld nicht, wenn die den Stromkreis umgebende Luft durch ein Medium von beliebigem — aber überall gleichem — μ ersetzt wird. Wird μ örtlich verschieden, so ändern sich die Felder von Strom und Doppelschicht in gleicher Weise durch Auftreten induzierter Mengen.

Und zwar gelten ganz allgemein — wie sich unschwer an der Hand der Gesetze der magnetischen Influenz übersehen läßt — für die Feldstärken H_D und H_S von Doppelschicht und Strom die Gleichungen:

$$H_D = c_1 . \Phi \text{ und } H_S = c . i \quad . . . 14)$$

(vgl. den Artikel „Magnetfeld", Gleichung (11)), wobei c_1 und c vom Maßsystem, von der Gestalt der Randkurve der Schicht, bezw. der Strombahn, von der Lage des Punktes, für den das Feld zu bestimmen ist und von der Verteilung der μ-Werte im Raume abhängen[1]).

Die Gleichwertigkeit eines einfachen Stromkreises mit einer bestimmten Doppelschicht besteht also ganz allgemein, und damit erhalten die im Artikel „Magnetfeld" Abschn. 5 aufgestellten Gesetze des Stromfeldes unbeschränkte Gültigkeit.

5b) Der magnetische Kreis. Ein ringartig in sich zurücklaufendes unmagnetisches Eisenstück (Fig. 8) von beliebiger Gestalt und beliebigem Querschnitt sei lückenlos mit N Drahtwindungen bedeckt, in denen der Strom i fließt. Das Eisenstück bildet dann einen sogenannten magnetischen Kreis. Die 𝔐- und die 𝔅-Linien (1) sind geschlossene Kurven, die bei hinreichender Dichte der Drahtwindungen ganz im Eisen verlaufen, ohne in die Luft auszutreten (vgl. den Artikel „Magnetfeld" S. 593f.). Die punktierte, immer parallel zum Feld gerichtete Linie deute den Verlauf eines Bündels der 𝔐-Linien an, von so kleinem Querschnitt, daß die Feldstärke $\mathfrak{H}$ und der Wert der Permeabilität μ sich über seine Ausdehnung nicht merklich verändern. Die Länge der punktierten Linie sei l, der mittlere Wert, den $\mathfrak{H}$ längs der Linie besitzt, sei H. Ein Einheitsnordpol bewege sich die Linie entlang — wozu man sich etwa das 𝔐-Linienbündel wie in 3f ausgebohrt denken mag. Die Arbeitsleistung bei einmaligem Polumlauf ist nach Artikel „Magnetfeld" S. 591 und nach diesem Artikel 5a gleich

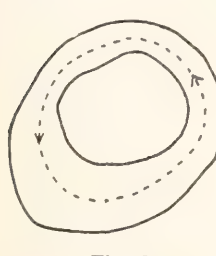


Fig. 8.

$$H . l = 4 \pi \varkappa . N . i.$$

Bezeichnet $\bar{\mu}$ die Permeabilität des Eisens, $\bar{q}$ den Bündelquerschnitt an der Stelle, wo die Feldstärke $\bar{H}$ ist, so gilt also

$$\bar{\mu} . \bar{H} . \bar{q} . l = 4 \pi \varkappa . \bar{\mu} . \bar{q} . N . i.$$

Längs des Bündels ist aber das Produkt aus μ. H und q. d. h. der 𝔐- bezw. 𝔅-Linienfluß, unveränderlich (1); statt der Werte $\bar{\mu}$, $\bar{H}$ und $\bar{q}$ kann man also im Produkt aller 3 Größen die Werte μ, H, q an irgend einer anderen Stelle des Bündels setzen und schreiben

$$\mu . H . q . l = 4 \pi \varkappa . \bar{\mu} . \bar{q} . N . i.$$

Bezeichnet man noch den 𝔐-Linienfluß- oder Induktionsfluß in dem Bündel mit Q_b, so gilt also

$$Q_b = \frac{4 \pi \varkappa . N . i}{\frac{l}{\bar{\mu} . \bar{q}}} = \frac{4 \pi \varkappa . N . i}{R_b}, \quad . . . . . . 15)$$

wobei R_b zur Abkürzung für $\frac{l}{\bar{\mu}\,\bar{q}}$ gesetzt und durch die Form des Bündels und die von ihm durchlaufenen Permeabilitäten bestimmt ist. $\frac{1}{R_b}$ wird die magnetische Kapazität des Bündelkreises genannt.

Für ein kreisförmiges Bündel vom Querschnitt q, der Länge l und überall gleichem μ wird

$$Q_b = \frac{4 \pi \varkappa . N . i}{\frac{l}{\mu q}} \quad . . . . . 15a)$$

Es tritt hier von neuem die Analogie des 𝔐- bezw. 𝔅-Linienflusses mit der elektrischen Strömung zutage. In einem linearen Leiterkreise (vgl. den Artikel „Magnetfeld" S. 590) von der Länge l, dem Querschnitt $\bar{q}$ und der elektrischen Leitfähigkeit $\bar{\lambda}$ am Ort des Mittelwertes, den die ein elektrisches Einheitsteilchen bewegende Kraft längs l besitzt, ist die Stromstärke i, die durch die elektromotorische Kraft E hervorgerufen wird, nach dem Gesetz von Ohm gleich

$$i = \frac{E}{\frac{l}{\bar{\lambda} . \bar{q}}} = \frac{E}{W} \quad . . . . 16)$$

wobei W der elektrische Leitungswiderstand heißt und von Gestalt und Leitfähigkeit des Kreises genau ebenso abhängt, wie R_b von der Gestalt und Permeabilität des magnetischen Kreisbündels. Für einen Kreis von überall gleichem q und λ wird

$$i = \frac{E}{\frac{l}{\lambda . q}} \quad . . . . 16a)$$

Die Analogie der Gleichungen (15) und (15 a) mit (16) und (16 a) hat dazu geführt,

---

[1]) Da im allgemeinen μ mit $\mathfrak{H}$, d. h. mit Φ und i veränderlich ist (4), so hängen also auch c_1 und c von Φ oder i ab, aber beide in gleicher Weise, so daß immer $c = \varkappa . c_1$ ist, wo $\varkappa$ nur vom Maßsystem abhängt (vgl. den Artikel „Magnetfeld 5b).

die Größe $4\pi\varkappa.N.i$ als *magnetomotorische Kraft* in dem Kreise des Bündels und die Größe $\frac{l}{\mu\, q}$ bez. $\frac{l}{\mu\, q} = R_b$ als *magnetischen Widerstand* des Kreises zu bezeichnen (vgl. den Artikel „*Magnetfeld*“ S. 590)[1]).

Es ist aber hervorzuheben, daß die Analogie insofern unvollkommen ist, als der elektrische Widerstand W der Leiter unter allen Umständen konstant ist, während dies von dem magnetischen Widerstande wegen der Veränderlichkeit von μ mit der Feldstärke durchaus nicht gilt. Die Analogie ist nur formal, für die Berechnung nutzbar, aber nicht im Wesen der Erscheinungen begründet.

Um den gesamten $\mathfrak{M}$-Linien- oder Induktionsfluß oder die Gesamtinduktion Q in dem Eisenkörper von Figur 8 zu erhalten, sind die Q_b aller einzelnen Bündel zu addieren, geradeso wie die Strömung in einem beliebigen Leiter sich aus einer Anzahl linearer Ströme zusammensetzt. Unterscheidet man die den einzelnen Bündeln zugehörigen Größen durch Ziffern, so ist also nach Gleichung 15

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots\dots \\ &= \frac{4\pi\varkappa.N.i}{R_1} + \frac{4\pi\varkappa.N.i}{R_2} + \dots. \\ &= 4\pi\varkappa.N.i\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots\right) \\ &= \frac{4\pi\varkappa.N.i}{R}, \end{aligned}$$

wenn R den magnetischen Gesamtwiderstand des ganzen Eisenstücks bezeichnet.

Die Berechnung des $\mathfrak{M}$- bez. $\mathfrak{B}$-Linienflusses in beliebigen Körpern kann bei gegebener magnetomotorischer Kraft und gegebenen μ-Werten nach denselben Gesetzen erfolgen, wie die Berechnung der elektrischen Strömung in demselben Körper, wenn seine Leitfähigkeit λ gleich μ wäre, und die elektromotorische Kraft E gleich der magnetomotorischen.

Da im absoluten Maßsystem $\varkappa = 1$ ist (vgl. den Artikel „*Magnetfeld*“ 5 b), so erhält hier die magnetomotorische Kraft den Wert 1, wenn in 1 Windung der Strom $\frac{1}{4\pi}$ nach absolutem Maße fließt. In der Technik benutzt man als Maßeinheit für die magnetomotorische Kraft die *Ampèrewindung* (AW). 1 AW entsteht, wenn in 1 Windung der Strom 1 Ampère fließt. Diese Einheit ist also das $\frac{4\pi}{10}$-fache der absoluten, weil 1 Ampère gleich $^1/_{10}$ absolute Einheit.

5c) *Streuung bei vollständigem Kreis.* Es liege jetzt ein Kreisring vor (Fig. 9); die Bewickelung bedecke aber nur einen kleinen Teil A B des Ringes. Es zeigt sich, daß aus dem Teile A C B einzelne Linien in die Luft austreten, eine Erscheinung, die man als *Streuung* bezeichnet. Den $\mathfrak{M}$-Linien bieten sich jetzt von A über C nach B zweierlei Wege, einerseits ganz durch Eisen, andererseits teils durch Eisen teils durch Luft. Würden alle Linien, die nicht ganz im Eisen bleiben, schon bei A aus dem Ring aus- und bei B wieder eintreten, so hätte man eine einfache Verzweigung des Linienstromes. Ein Bündel würde auf seinem Wege von A nach B entweder nur die Permeabilität des Eisens (μ) antreffen oder nur die der Luft (μ_0), und da der Widerstand eines jeden Bündels oder Bündelstückes sich bei gegebener Form und Größe des Ringes nach Gleichung (15) und nach der Anmerkung auf dieser Seite im umgekehrten Verhältnis zu dem μ der vom Bündel durchsetzten Materie ändert, so würden auch die Gesamtwiderstände des Eisen- und des Luftweges sich verhalten wie $\mu_0 : \mu$, und damit die gesamten $\mathfrak{M}$-Linienströme in Luft und in Eisen wie $\mu_0 : \mu$; d. h. aber, durch die Luft würden nur äußerst wenig Linien gehen. Tatsächlich zweigen nun nicht bloß bei A und B Linien von dem Eisenwege ab, sondern an allen Stellen desselben. Es wird daher der Widerstand, den die ganz im Eisen laufenden Linien zu überwinden haben, zu dem Gesamtwiderstande des verzweigten Bahnsystems der austretenden Linien nicht mehr in dem einfachen Verhältnis $\mu_0 : \mu$ stehen, sondern größer sein, und damit auch die Streuung stärker.

5d) *Streuung bei aufgeschnittenem Kreis.* Es werde jetzt aus dem Ring bei C ein Stück DE herausgenommen. Dadurch wird die Streuung viel stärker. Dies kommt daher, daß der Widerstand des Weges, der von A bis D und von E bis B durch das Eisen und nur von D bis E durch den Luftschlitz führt, bedeutend gewachsen ist im Verhältnis zu dem Gesamtwiderstande der Wege, die zwischen A und D aus- und zwischen E und B wieder eintreten. Die Zahl der Linien, die diese Wege einschlagen, ist also gewachsen im Verhältnis zur Zahl der Linien, die nur zwischen D und E durch die Luft gehen. Das Verhältnis des gesamten Linienflusses an einer Stelle des Ringes zu der Gesamtzahl der Linien, die den Luftschlitz von D nach E durchsetzen, heißt „*Streuungskoeffizient*“.

Für die Rechnung setzt sich der Widerstand, den ein Bündel auf dem punktierten Wege findet, aus 2 Teilen zusammen, aus dem Widerstande R_e des Eisenweges und aus dem des Luftweges R_l. Für den Linienfluß in dem Bündel gilt daher

$$Q_b = \frac{4\pi\varkappa.N.i}{R_e + R_l}.$$

5e) *Magnetisierung von Stäben und Ellipsoiden. Entmagnetisierungsfaktor.* Es reduziere sich der Ring weiter auf das kurze bewickelte Stück, das als gerader Stab angesehen werden kann. Der Linienfluß innerhalb der einzelnen Bündel bestimmt sich auch jetzt wieder durch die letzte Gleichung, wobei aber R_l sehr viel größer geworden ist. Q_b und damit der gesamte $\mathfrak{M}$-Linienfluß durch die Spule ist also bedeutend geschwächt.

Faßt man statt des $\mathfrak{M}$-Linienbildes das

---

[1]) Die Gleichungen 15 und 15a gelten — wie auf genau demselben Wege abzuleiten — in derselben Form auch für jedes *Stück* des vom Bündel gebildeten Kreises, nur tritt an die Stelle der magnetomotorischen Kraft $4\pi\varkappa.N.i$ die *Potentialdifferenz* zwischen den Enden des Stücks und an die Stelle der ganzen Kreislänge l die Länge des Stücks.

$\mathfrak{H}$-Linienbild ins Auge, so kann man das auch so ausdrücken: an den Endflächen des Eisenstückes bei A und B finden sich Endpunkte von $\mathfrak{H}$-Linien, d. h. induzierte magnetische Mengen (3b, c), und zwar entspringen bei der in der Figur 9 angenommenen Stromrichtung

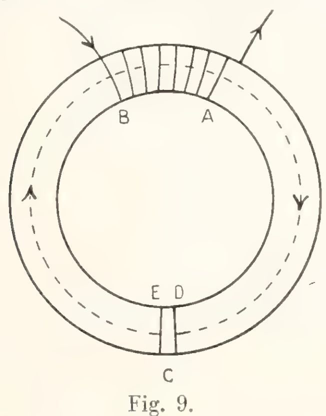


Fig. 9.

$\mathfrak{H}$-Linien bei A und laufen im Bogen nach B, wo sie münden. D. h. bei A liegen induzierte nordmagnetische, bei B südmagnetische Mengen. Diese induzierten Mengen bewirken, daß die Feldstärke im Eisenstück geringer wird als sie im geschlossenen Eisenringe war; damit wird also auch $\mathfrak{M}$ und der gesamte $\mathfrak{M}$-Linienfluß herabgedrückt. Die beiden Enden üben, wie man auch sagt, eine „entmagnetisierende" Wirkung auf das Innere des Eisenstückes aus, d. h. die induzierte Magnetisierung $\mathfrak{J}'$ bestimmt sich nicht aus dem Felde $\mathfrak{H}$ des magnetisierenden Stromes allein (nach Gleichung 10), das sich so berechnet, als ob das Eisen nicht da wäre, sondern aus dem Felde, das sich aus $\mathfrak{H}$ und dem Felde $\mathfrak{H}'$ der Mengen an den Enden zusammensetzt. Die induzierte Magnetisierung wird durch die Wirkung von $\mathfrak{H}'$ geringer — was ja nach Gleichung (13) auch wieder nur ein anderer Ausdruck dafür ist, daß $\mathfrak{M}$ kleiner wird.

Die entmagnetisierende Wirkung der Enden des Eisenstückes hängt ab von seiner Form und von der Stärke der vorhandenen Magnetisierung. Die Wirkung ist natürlich auch bei wahrer Magnetisierung, also z. B. in einem Stabmagneten, vorhanden. Sie ist ferner an den verschiedenen Stellen eines Körpers verschieden; in der Nähe der Enden beträchtlicher als weiter davon, so daß man im allgemeinen von einer mittleren entmagnetisierenden Feldstärke $\mathfrak{H}'$ reden wird. Die Wirkung geht von den Endpunkten der freien Magnetisierungslinien aus, von den freien magnetischen Mengen. Aendert sich also in allen diesen Punkten die Anzahl der endenden $\mathfrak{J}$-Linien in gleichem Verhältnis, d. h. ändert sich die freie Magnetisierung $\mathfrak{J}$ überall im gleichen Verhältnis, ohne daß neue Endpunkte von $\mathfrak{J}$-Linien auftreten, so wird sich auch der Wert von $\mathfrak{H}'$ in den einzelnen Punkten des Körpers und sein Mittelwert $\mathfrak{H}'$ im selben Verhältnis ändern. Nun treten neue Endpunkte nicht auf, solange die wahren Mengen und die Permeabilität μ ungeändert bleiben (Gleichung (6) und Artikel „Magnetfeld" S. 597 f.). Unter diesen Bedingungen also gilt für die entmagnetisierende Kraft $\mathfrak{H}'$ in den einzelnen Punkten, wenn $\mathfrak{J}$ einen Mittelwert der Magnetisierung bezeichnet,

$$\mathfrak{H}' = N . \mathfrak{J}.$$

Der Faktor N heißt der Entmagnetisierungsfaktor und ist im allgemeinen für alle Punkte verschieden. Setzt man für $\mathfrak{H}'$ den Mittelwert $\mathfrak{H}'$, so wird

$$\mathfrak{H}' = N . \mathfrak{J},$$

wo nun $\overline{N}$ der mittlere Entmagnetisierungsfaktor genannt wird.

Für Stäbe von kreisförmigem Querschnitt steht $\overline{N}$, sobald das Verhältnis der Stablänge l zum Stabdurchmesser d größer als 100 ist, in konstantem Verhältnis zu der Größe $\left(\frac{d}{l}\right)^2$. $\overline{N}$ wird also verschwindend klein für sehr lange oder für sehr dünne Stäbe.

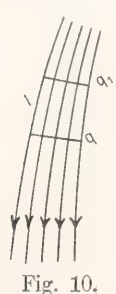
Für ein unmagnetisches homogenes Ellipsoid, das in ein gleichförmiges Feld $\mathfrak{H}$ gebracht wird, hat N in allen Punkten denselben Wert, fällt also mit $\overline{N}$ zusammen. D. h. $\mathfrak{H}'$ ist gleichförmig und ebenso das aus $\mathfrak{H}$ und $\mathfrak{H}'$ resultierende Feld, damit aber auch die induzierte Magnetisierung $\mathfrak{J}'$ nach Gleichung (10).

6. Die Energie des Feldes. 6a) Ableitung des Ausdrucks für die Energie statischer Felder. Das $\mathfrak{M}$-Linienbild eines Magneten in beliebiger Umgebung besteht nach I aus einer Anzahl von Linien, deren jede von der wahren nordmagnetischen Menge 1 nach der südmagnetischen Menge 1 hinläuft.

Den Magnetisierungsvorgang kann man sich so vorstellen, daß die im unmagnetischen Eisen paarweise zusammenliegenden entgegengesetzten Einheitsmengen auseinandergeführt und in ihre Lagen im Magneten gebracht werden. Dabei muß eine bestimmte Arbeit gegen die zwischen den Mengen wirkenden Kräfte geleistet werden, und diese Arbeit ist nach der Potentialtheorie (vgl. den Artikel „Magnetfeld" S. 584) unabhängig von den Wegen, auf denen die Mengen aus ihrer ursprünglichen Lage in die Endlage gebracht werden. Umgekehrt leisten die magnetischen Kräfte dieselbe Arbeit, wenn die Magnetisierung verschwindet, was man sich etwa so vorstellen kann, daß jede nordmagnetische Einheitsmenge längs der von ihr ausgehenden $\mathfrak{M}$-Linie nach der am anderen Linienende liegenden südmagnetischen Einheitsmenge wandert und sich mit dieser vereinigt.[1]) Dabei soll aber jede einzelne Menge nicht mit einem Male fortwandern, sondern von jeder immer nur derselbe, so kleine Bruchteil, daß die wandernden Mengen das Feld nicht merklich verändern, und der Verlauf der $\mathfrak{M}$-Linien

[1]) Dieses Wandern mag in engen Kanälen der in 3 f beschriebenen Art erfolgen.

immer derselbe bleibt, während ihre Zahl allmählich abnimmt im selben Verhältnis wie die magnetischen Mengen.[1]) Figur 10 stelle ein Stück eines Bündels von 𝔐-Linien dar von so kleinem Querschnitt q, daß über dessen Ausdehnung die Dichte M der 𝔐-Linien nicht merklich veränderlich ist. Dann ist der 𝔐-Linienfluß in dem Bündel M.q, und an den Bündelenden sitzen magnetische Mengen ebenfalls vom Betrage M.q. Grenzt man ein kleines Stück des Bündels durch zwei Querschnitte q und q_1 von so geringer Entfernung l ab, daß in dem abgegrenzten Raumteil die Feldstärke $\mathfrak{H}$ und der Querschnitt q als konstant angesehen werden kann, so durchwandert bei dem geschilderten Entmagnetisierungsvorgang die magnetische Menge M.q den Raumteil unter Einwirkung einer Feldstärke, die im Mittel während der ganzen Entmagnetisierung den Betrag $\frac{1}{2}$ H und immer dieselbe Richtung hat. Es wird also von den magnetischen Kräften an der magnetischen Menge M.q, während sie den kleinen Raumteil vom Volumen v = q.l durchwandert, die Arbeit geleistet


Fig. 10.

$$(M.q)\frac{H}{2}.l = \frac{1}{2}\mu H.H.q.l$$
$$= \frac{1}{2}\mu H^2.v, \quad \ldots\ldots 17)$$

wenn μ die Permeabilität im Innern von v ist.

Diese Arbeitsgröße heißt die in dem Volumen v vorhandene magnetische Energie.

Es ist also die in der Volumeinheit enthaltene magnetische Energie gleich $\frac{1}{2}\mu H^2$.

Indem man sich das ganze Feld in 𝔐-Linienbündel der beschriebenen Art zerlegt denkt, kommt man dazu, jeder Volumeneinheit ihren bestimmten Energiebetrag zuzuweisen. Die Summierung über alle Volumeinheiten des ganzen Feldes — die durch Ziffern unterschieden werden mögen — gibt die Gesamtenergie W_m des Feldes:

$$W_m = \frac{1}{2}(\mu_1 H_1^2 + \mu_2 H_2^2 + \ldots),$$

was man durch Einführung des Summierungszeichens Σ abkürzend so schreibt

$$W_m = \frac{1}{2}\Sigma\,\mu H^2 \quad \ldots\ldots 18)$$

Diesem Ausdruck für die Energie läßt sich eine andere Form geben. In Gleichung (17) stellt das Produkt μH.q den Betrag $\mathfrak{m}_0$ der magnetischen Mengen dar, die sich an den beiden Bündelenden befinden. Bei der Summierung über alle kleinen Raumteile 1, 2, ... des einzelnen Bündels tritt dieses Produkt vom Werte $\mathfrak{m}_0$ wegen der Erhaltung des 𝔐-Linienflusses als konstanter Faktor auf, d. h. die Energie des einzelnen Bündels wird

$$w_m = \frac{1}{2}\mathfrak{m}_0(H_1 l_1 + H_2 l_2 + \ldots)$$
$$= \frac{1}{2}\mathfrak{m}_0\,\Sigma\,H.l.$$

Die Summe Σ H.l ist aber die Arbeit, die von den magnetischen Kräften geleistet wird, wenn die nordmagnetische Menge 1 sich vom Nordende des Bündels zum Südende bewegt, d. h. die Potentialdifferenz zwischen den beiden Bündelenden. Bezeichnet V_a das magnetische Potential am Anfang, V_e am Ende des Bündels, so wird

$$w_m = \frac{1}{2}\mathfrak{m}_0(V_a - V_e) \quad \ldots 19)$$
$$= \frac{1}{2}\mathfrak{m}_0 V_a - \frac{1}{2}\mathfrak{m}_0 V_e.$$

Werden die nord- und südmagnetischen Mengen durch die Zeichen + und — unterschieden, so kann man also auch sagen: die gesamte magnetische Energie W_m des Feldes ist gleich der halben Summe aller Produkte aus der einzelnen wahren magnetischen Menge und dem magnetischen Potential am Ort der betreffenden Menge, wobei jede südmagnetische Menge das Zeichen — erhält und zu beachten ist, daß auch die Potentiale V ein Vorzeichen haben (vgl. den Artikel „Magnetfeld" 3c)

$$W_m = \frac{1}{2}\Sigma\,\mathfrak{m}_0.V \quad \ldots\ldots 20)$$

6b) Uebertragung auf elektromagnetische Felder. Selbstinduktionskoeffizient. Die Uebereinstimmung der Felder eines einfachen linearen Stromkreises und einer bestimmten Doppelschicht (vgl. den Artikel „Magnetfeld" S. 590 und diesen Artikel 5 a) legt die Annahme nahe, daß auch die magnetische Energie dieses Stromfeldes,

[1]) Dies ist nur möglich, wenn die Permeabilität im ganzen Feld von der Feldstärke unabhängig ist. Die hier zu gewinnenden Ausdrücke für die Energie und alle daraus abgeleiteten gelten also nicht für ferromagnetische Körper. Ein für den Fall der Abhängigkeit des μ vom Felde geltender Ausdruck für die Energie ist aber ebenfalls auf Grund der hier angestellten, unschwer zu modifizierenden Überlegungen abzuleiten und in Cohn Das elektromagnetische Feld S. 512 zu finden.

und damit nach Artikel „Magnetfeld“ S. 590 aller beliebigen Stromfelder, sich durch die Gleichung (18) ausdrückt. Die Erfahrung hat dieser Annahme und den daraus gezogenen Folgerungen noch nicht widersprochen. Solange also μ unabhängig von $\mathfrak{H}$ ist, gilt:

II. Die Energie der Volumeinheit des Feldes an einer Stelle der Permeabilität μ ist

$$\frac{1}{2}\mu H.^2$$

Für das Feld $\mathfrak{H}$ eines linearen Stromes gilt die Gleichung (14)

$$H = c.\ i.$$

Hier nimmt also der Ausdruck für die Energie die Form an

$$\begin{aligned} Wm &= \frac{1}{2}\Sigma\ \mu\ H^2 \\ &= \frac{1}{2}\ i^2\ \Sigma\ \mu\ c^2 \\ &= \frac{1}{2}\ p\ i^2, \quad \ldots\ldots\ldots 21) \end{aligned}$$

wenn man zur Abkürzung für die Summe $\Sigma\ \mu c^2$ das Zeichen p setzt. p heißt der Selbstinduktionskoeffizient des linearen Stromkreises.

Die Veranschaulichung dieser Größe durch das $\mathfrak{M}$- bez. $\mathfrak{B}$-Linienbild des Feldes erkennt man so. In Figur 11 sollen A und B Punkte sein, in denen ein linearer Strom aus der Zeichenebene heraus-, bezw. in sie hineintritt. Die Linien $v\ v$ und $\mathfrak{M}\ \mathfrak{M}$ sollen die Niveauflächen und $\mathfrak{M}$-Linien andeuten. Durch die Niveauflächen und durch dünne Bündel von $\mathfrak{M}$-Linien wird das Feld in kleine Raumteile,

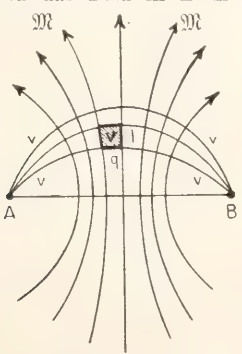


Fig. 11.

wie z. B. v, abgeteilt. In v sei der Bündelquerschnitt q, die Permeabilität μ und das Feld H. Ferner habe v die Höhe l. Der Energieinhalt von v ist also

$$\frac{1}{2}\mu\ H^2 . v = \frac{1}{2}\mu\ H.q.H.l.$$

Das Produkt μ H q hat für alle in demselben Bündel liegenden Raumteile denselben Wert, und tritt daher bei der Summation über alle Raumteile des einzelnen Bündels als konstanter Faktor heraus, so daß die Energie des Bündels wird

$Wm = \frac{1}{2}\mu Hq.\Sigma H.l$ (vgl. den Artikel „Magnetfeld“ 5d, Gleichung (13)).

Die Summe aber ist die Arbeit, die von den magnetischen Kräften beim einmaligen Umlaufe eines Einheitsnordpoles geleistet wird, also ist

$$Wm = \frac{1}{2}\mathfrak{M}.q.4\pi\varkappa.i.$$

$\mathfrak{M}$.q ist der $\mathfrak{M}$-Linienfluß in dem Bündel. Bei der Summation über alle Bündel ist der Faktor $\frac{4\pi\varkappa.i}{2}$ konstant, und die Addition der anderen Faktoren $\mathfrak{M}$.q ergibt den gesamten $\mathfrak{M}$- bez. $\mathfrak{B}$-Linienfluß oder die gesamte Induktion Q durch den Stromkreis. Die Gesamtenergie ist daher

$$Wm = \frac{1}{2}Q\,4\pi\varkappa.i.$$

Der Vergleich mit Gleichung (21) ergibt

$$p = \frac{4\pi\varkappa Q}{i} \quad \ldots\ldots\ldots 22)$$

Da im absoluten Maßsystem $\varkappa = 1$ ist, so ist also der Selbstinduktionskoëffizient das 4π-fache der gesamten Zahl von $\mathfrak{M}$- ($\mathfrak{B}$-)Linien, die ein linearer Strom der absoluten Stärke 1 durch seine eigene Stromschleife hindurchschickt (vgl. auch den Artikel „Induktivität“).

6c) Verschiedene Energieänderung des statischen und elektromagnetischen Feldes durch denselben Vorgang. Die Energie des statischen und des elektromagnetischen Feldes ist also durch denselben Ausdruck (Gleichung 18) gegeben. Trotzdem bestehen zwischen den Energieverhältnissen beider Felder wesentliche Unterschiede.

Es werde z. B. ein Stück unmagnetisches Eisen in das Feld eines Magneten und in das eines Stromes gebracht. Das Feld des Magneten denke man sich durch Aequipotentialflächen in Lamellen oder Schalen geteilt und zwar so daß zwischen je zwei benachbarten Flächen dieselbe Potentialdifferenz besteht. Durch die Anwesenheit des Eisenstückes — und ebenso jedes anderen Körpers von größerem μ als die Umgebung — werden die Niveauflächen (siehe Fig. 2) aus dem vom Eisen eingenommenen Raume hinausgedrängt. Diese Störung des Flächenverlaufs erstreckt sich über das ganze Feld, wenn auch in stark abnehmendem Betrage, so daß in einiger Entfernung die Flächen kaum verändert erscheinen. Auch an den Polen ist also die Störung vorhanden, und es werden hier von den den Pol unmittelbar umhüllenden Flächen je nach der Stärke der Feldstörung eine größere oder kleinere Zahl in den Pol hineingedrängt werden, d. h. sich in ihn zusammenziehen. Es wird also die Potentialdifferenz zwischen den Polen kleiner und damit nach Gleichung (19) auch die Energie des Feldes.

Wird das Eisenstück dagegen in das Feld eines linearen Stromes gebracht, so wird der magnetische Widerstand der $\mathfrak{M}$-Linienbahn verkleinert, der gesamte Induktionsfluß Q durch die Stromschleife also stärker und damit nach Gleichung 22 und 21 der Selbstinduktionskoeffizient und die magnetische Energie des Feldes größer.

6d) **Die Arbeit der magnetischen Kräfte im statischen Felde ist gleich der Abnahme der magnetischen Energie.** Es werde ferner in die Nähe eines Magneten ein zweiter Magnet gebracht — es soll aber dabei das Feld jedes der beiden Magnete ungeändert bleiben, d. h. die Magnete sollen die Permeabilität ihrer Umgebung besitzen. Die Gesamtenergie des resultierenden Feldes ist dann nicht gleich der Summe der Einzelenergien jedes der beiden Felder für sich, denn zu der Arbeitsleistung, die mit der Verteilung der magnetischen Mengen in jedem der beiden Magnete für sich allein verbunden ist, kommt hinzu die Arbeit, die bei der Bewegung des Magneten 1 samt seinen magnetischen Mengen in das Feld des Magneten 2 hinein von den magnetischen Kräften oder gegen die magnetischen Kräfte zu leisten ist.

Diese Arbeit wird nach dem Artikel „Magnetfeld" 3b und 3c dadurch erhalten, daß man jede im Magneten 1 befindliche magnetische Menge m_{01} mit dem Potentiale V_2 multipliziert, das der Magnet 2 an der Stelle hervorruft, an die m_{01} zu liegen kommt und die Summe aller so entstandenen Produkte bildet. Dabei ist wie in 6a jeder südmagnetischen Menge das Zeichen — zu geben und darauf zu achten, daß auch V ein Vorzeichen hat. Die Arbeit werde mit W_m' bezeichnet und ist also

$$W_m' = \Sigma_1 m_{01} V_2.$$

Sie heißt die wechselseitige Energie der beiden Magnete 1 und 2.

Das Energieprinzip verlangt, daß der Energieaufwand, der mit der Beförderung des Magneten 1 in das Feld von 2 verbunden ist, gleich ist dem bei der Beförderung von 2 in das Feld von 1. Denn sonst wäre, wie eine einfache Ueberlegung zeigt, ein dauernder Gewinn mechanischer Arbeit ohne entsprechenden Energieverbrauch möglich. Es muß also gelten

$$\Sigma\, m_{01} V_2 = \Sigma\, m_{02} V_1,$$

wo V_1 das vom Magneten 1 erzeugte Potential bezeichnet. Die Gesamtenergie W_m des Feldes ist, wenn W_{m_1} und W_{m_2} die Energien der Einzelfelder der beiden Magnete sind

$$W_m = W_{m_1} + W_{m_2} + W_m' \quad \ldots \quad 23)$$

Für die in Figur 12 gezeichnete Lage der beiden Magnete z. B. ist W_m' negativ, d. h. die Energie des resultierenden Feldes kleiner als die Summe der Energien der Einzelfelder. Dies rührt daher, daß bei Herstellung der gezeichneten Magnetlage von den magnetischen Kräften Arbeit geleistet wird, der einzige Energievorrat aber aus dem diese Arbeit genommen wird, die magnetische Energie ist, während alle anderen, in mechanische Arbeit umsetzbaren Energieformen, wie Wärme, chemische Energie, usw. keinerlei Veränderung erfahren. Voraussetzung dafür, daß bei der Bewegung Energieumsetzungen merklich nur zwischen magnetischer und mechanischer Energie stattfinden, ist allerdings, daß die Bewegung sehr langsam vor sich geht, da sonst die dabei induzierten elektrischen Ströme und die damit verbundenen Energieformen berücksichtigt werden müssen (vgl. den Artikel „Induktivität"). Also gilt:

III. **Die bei irgendeiner langsamen Bewegung im statischen Felde von den magnetischen Kräften geleistete Arbeit ist gleich der dabei stattfindenden Verminderung der magnetischen Energie des Feldes. Alle von den magnetischen Kräften hervorgerufenen Bewegungen erfolgen so, daß dabei die magnetische Energie abnimmt.**

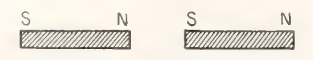


Fig. 12.

Es kann keine Bewegung durch die magnetischen Kräfte stattfinden, d. h. es ist Gleichgewicht vorhanden, wenn die magnetische Energie den kleinsten im gegebenen Falle möglichen Wert angenommen hat.

6e) **Die Arbeit der magnetischen Kräfte im elektromagnetischen Felde ist gleich der Zunahme der magnetischen Energie.** Es werde jetzt ebenso in die Nähe eines linearen Stromkreises ein zweiter gebracht. Die Berechnung der Gesamtenergie des resultierenden Feldes — auf dem in 6b angegebenen Wege — führt zu einem Ausdruck derselben Form wie in Gleichung 23, also

$$W_m = W_{m\,1} + W_{m\,2} + W_m'.$$

Es bezeichne p_1 den Selbstinduktionskoeffizienten des 1. Stromkreises, p_2 den des 2., p_{12} eine Größe, die der wechselseitige Induktionskoeffizient der Kreise 1 und 2 heißt und gleich ist dem 4π-fachen der Zahl von Induktionslinien, die ein Strom von der absoluten Stärke 1 im Kreise 1 durch den Kreis 2 hindurchschickt. p_{12} ist positiv, wenn die Linien durch den Kreis 2 im selben Sinne hindurchtreten, wie seine eigenen Linien. Dann ist, wenn in 1 der Strom i_1, in 2 i_2 fließt,

$$W_m = \frac{1}{2} p_1 i_1^2 + \frac{1}{2} p_2 i_2^2 + p_{12} i_1 i_2.$$

Für die in Figur 13 gezeichnete Lage und Stromrichtung der beiden Kreise ist p_{12} positiv, also die Gesamtenergie größer als die Summe der Energien der Einzelfelder. Trotzdem ist bei Herstellung der gezeichneten Lage von den magnetischen Kräften Arbeit geleistet worden, wie man erkennt, wenn man sich die Stromkreise durch Doppelschichten ersetzt denkt. Der dem Energiezuwachs des Feldes und der Arbeitsleistung entsprechende Energiebetrag stammt aus den Stromquellen der beiden Kreise, während

die diesen entnommene elektrische Energie bei ruhenden Kreisen nur in Stromwärme umgesetzt wird. Die Erfahrung zeigt, daß der Energiezuwachs und der Arbeitsbetrag einander gleich sind:[1])

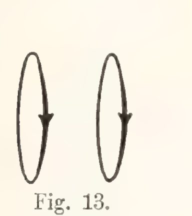


Fig. 13.

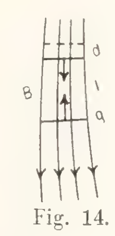


Fig. 14.

IV. *Die bei irgendeiner langsamen Bewegung von Stromkreisen gegeneinander von den magnetischen Kräften geleistete Arbeit ist gleich der Zunahme der magnetischen Energie des Feldes.*

Alle durch die magnetischen Kräfte hervorgerufenen Bewegungen von Stromkreisen gegeneinander erfolgen so, daß dabei die magnetische Energie zunimmt.

Es ist Gleichgewicht vorhanden, wenn die magnetische Energie den größten unter den gegebenen Bedingungen möglichen Wert angenommen hat.

Für die Bewegung eines Stromkreises und eines stromlosen unmagnetischen Körpers gegeneinander gelten diese letzten Sätze ebenfalls.

Trägt der Körper bei unveränderter Permeabilität noch wahre magnetische Mengen, so ändert sich die magnetische Energie des von ihm und vom Stromkreise gebildeten Feldes bei einer gegenseitigen Verschiebung um denselben Betrag wie beim unmagnetischen Körper. Die mit der Verschiebung verbundene Arbeitsleistung der an den wahren magnetischen Mengen angreifenden Kräfte wird aus dem elektrischen Energievorrat des Stromkreises gedeckt; eine Aenderung der magnetischen Energie ist damit nicht verknüpft.

7. Der Zustand des Feldes. 7 a) *Der Längszug in den Feldlinien.* Zwei Stabmagnete seien einander in der Weise mit entgegengesetzten Polen gegenübergestellt wie Figur 10 im Artikel „*Magnetfeld*" zeigt. Sie mögen um ein so kleines Stück auseinandergerückt werden, daß sich der Verlauf der 𝔐-Linien nirgends merklich ändert. Die Linien werden also nur gedehnt. Ein Stück B (Fig. 14) eines Linienbündels von so kleinem Querschnitt q und so kleiner Länge l, daß in seinem ganzen Innern das Feld den Wert H besitzt, werde dabei um das sehr kleine Stück d verlängert. Dadurch vergrößert sich die zwischen den beiden Endquerschnitten von B enthaltene Energie um $\frac{1}{2}\mu H^2.q.d$, wenn μ die Permeabilität der Materie ist, die das Bündel an der betrachteten Stelle erfüllt. Nach dem Energieprinzip erfordert also die Verlängerung d einen Arbeitsaufwand vom Betrage

$$\frac{1}{2}\mu H^2.q.d.$$

Im allgemeinen werden sich bei der Dehnung die beiden Endquerschnitte von B verschieben; für die Arbeitsleistung aber kommt nur ihre *gegenseitige* Bewegung in Betracht, so daß man den einen Querschnitt als fest und den anderen um d verschoben annehmen kann, wie es auch in Figur 14 geschehen ist. Es ist also d der bei der Arbeitsleistung von der einen (oder anderen) Endfläche in der Längsrichtung des Bündels zurückgelegte Weg, d. h. es erscheint der Faktor $\frac{1}{2}\mu H^2.q$ als die *Zugkraft*, die an einer der beiden Endflächen senkrecht nach außen gerichtet (entgegen den Pfeilen der Figur) angreifen muß, damit die Verlängerung d zustande kommt, oder umgekehrt: die beiden Endflächen von B werden von Kräften in ihrem ursprünglichen Abstande zusammengehalten, die die Richtung der Pfeile und für jede Fläche die Größe

$$\frac{1}{2}\mu H^2.q,$$

also für die Flächeneinheit die Größe

$$\frac{1}{2}\mu H^2$$

haben. Das Bündel verhält sich wie ein elastischer, parallel zum Feld gedehnter Faden, sucht sich also zu verkürzen. Bei diesem Vergleich ist aber zu beachten, daß die auf den Bündelquerschnitt wirkende Zugkraft oder die Spannung nicht wie bei einem Faden über die ganze Länge konstant ist, denn längs des Bündels ist $\frac{1}{2}\mu H.q$ konstant, aber nicht $\frac{1}{2}\mu H^2.q$.

7b) *Der Querdruck der Feldlinien.* Es werde ferner das Bündel von der Seite her zusammengedrückt, so daß der Querschnitt kleiner wird. Dieser sei kreisförmig und bleibe es auch bei der Zusammendrückung. Das Stück B (Fig. 15) des Bündels habe anfänglich den Radius r und dieser verkleinere sich durch das Zusammendrücken um d. In dem zylindrischen Stück B befindet sich nach dem Zusammendrücken mehr Energie als vorher, und zwar ist der Mehr-

[1]) Wieder unter der Voraussetzung, daß die Bewegung hinreichend langsam erfolgt, vgl. 6d.

betrag gleich der Energie, die in dem Raume zwischen den alten und den neuen Begrenzungsflächen von B enthalten ist, da die vorher hier verlaufenden Linien in den punktierten Zylinder hineingedrückt werden. Das Volumen dieses Raumes ergibt sich für den Fall, daß d sehr klein ist gegenüber r, durch einfache stereometrische Rechnung zu

$$2\pi r.d.l,$$

also die darin enthaltene Energie zu

$$\left(\frac{1}{2}\mu H^2.2\pi r.l\right).d.$$

Gerade so groß ist die beim Zusammendrücken zu leistende Arbeit. Sie läßt sich wieder auf-

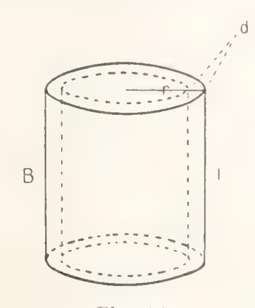


Fig. 15.

fassen als geleistet von senkrecht zur Mantelfläche des Zylinders gerichteten Druckkräften vom Gesamtbetrage

$$\frac{1}{2}\mu H^2.2\pi r.l,$$

also vom Betrage

$$\frac{1}{2}\mu H^2$$

auf die Flächeneinheit. Oder das Bündel übt auf die Flächeneinheit seiner Wand senkrecht nach außen einen Druck aus vom Betrage $\frac{1}{2}\mu H^2$. Es verhält sich wie ein ringsum zusammengedrückter elastischer Stab; oder die $\mathfrak{M}$-Linien suchen sich gegenseitig auseinanderzudrängen.

Die hier gegebene Ableitung ist die modifizierte Form einer von S. J. Barnett in Physikalische Zeitschr. 6 S. 8. 1905 durchgeführten. Nach Anmerkung 1 auf S. 678 gelten die gefundenen Werte für die Spannungen nur soweit, als μ von $\mathfrak{H}$ unabhängig ist. Wo dies nicht der Fall ist, erhalten Zug und Druck andere und voneinander verschiedene Werte (vgl. Cohn, Das elektromagnetische Feld" S. 518).

7c) Zurückführung der magnetischen Kräfte auf die Maxwellschen Spannungen. Auf diesen Spannungszustand im magnetischen Felde, der zuerst in den Anschauungen Faradays auftritt, und von Maxwell zuerst berechnet worden ist, lassen sich die scheinbaren Fernwirkungen der Kräfte im magnetischen Felde zurückführen, wie gleichfalls Maxwell gezeigt hat (siehe Literatur 9). Die $\mathfrak{H}$-Linienbündel stellen unsichtbare an den freien magnetischen Mengen angeheftete Fäden dar. Betrachtet man ein Stück eines solchen Fadens (Fig. 16) für sich, so wirkt auf jede zur Feldrichtung senkrechte Flächeneinheit seiner Oberfläche die Kraft $\frac{1}{2}\mu H^2$ im Sinne der Pfeile 11, auf jede zum Felde parallele Flächeneinheit eine gleich große Kraft im Sinne der Pfeile 22. Im Zusammenhang mit den angrenzenden Bündelteilen und Bündeln aber halten diesen von innen her auf die Oberfläche wirkenden Spannungskräften gleichgroße und entgegengesetzt gerichtete von außen her angreifende (in Figur 16 punktiert) das Gleichgewicht, sobald die Permeabilität μ zu beiden Seiten der Oberfläche denselben Wert hat. Wo dagegen die Oberfläche zwei Medien von verschiedenem μ trennt, da wirken von beiden Seiten ungleiche Kräfte auf sie ein und sie ist nicht im Gleichgewicht. Ist z. B. μ auf beiden Seiten einer Endfläche q verschieden, so hat das zu q senkrechte $\mathfrak{M} = \mu\,\mathfrak{H}$ auf beiden Seiten denselben Wert (2c), H und somit $\frac{1}{2}\mu H^2$ muß also verschieden sein. Zu beiden Seiten der Mantelfläche m hat das tangential verlaufende $\mathfrak{H}$ denselben Wert (2c); bei beiderseits ungleichem μ ist also ebenfalls $\frac{1}{2}\mu H^2$ verschieden. Wo also Medien von ungleichem μ aneinandergrenzen, da resultieren aus den Faraday-Maxwellschen Spannungen Kräfte auf die Grenzfläche. Mit diesen Kräften kann man an Stelle der Fernkräfte des Coulombschen Gesetzes zwischen den magnetischen Mengen rechnen, um die im Felde stattfindenden Bewegungen von Körpern richtig, d. h. den Beobachtungen entsprechend zu erhalten (ein Beispiel der Berechnung siehe 8c).

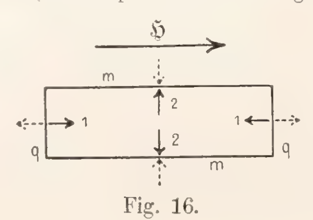


Fig. 16.

Figur 10 in Artikel „Magnetfeld", das Feld zweier entgegengesetzter Pole, und die folgende Figur 17, das Feld zweier gleichnamiger Pole, lassen übersehen, wie durch das Bestreben der $\mathfrak{H}$- und der $\mathfrak{M}$-Linien, sich zu verkürzen und die benachbarten Linien wegzudrängen, die Bewegung der beiden Pole aufeinander zu, bezw. voneinander weg zustande kommen kann.

Nur hingewiesen kann hier werden auf die Arbeiten Maxwells und daran anschließende (s. Literatur 10), in denen der Spannungszustand im Felde zurückgeführt wird auf Wirbelbewegungen; sowie auf die hiermit zusammenhängende Unterscheidung der elektrischen und

magnetischen Vektoren nach ihren Symmetrieeigenschaften, indem jene die Symmetrie eines ruhenden, diese die eines um seine Achse rotierenden Zylinders besitzen (s. Literatur 11).

7d) Die Maxwellschen Spannungen sind keine elastischen Spannungen. Man darf nun aber nicht etwa annehmen, daß den Maxwellschen Spannungen in den Linienbündeln

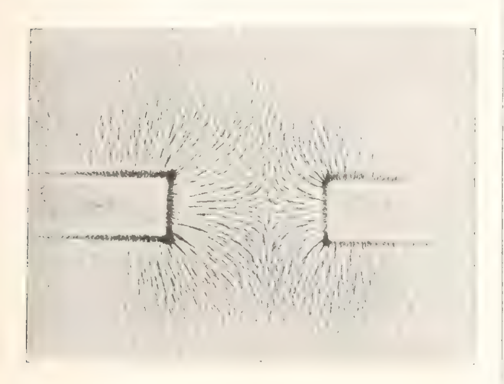


Fig. 17.

des Feldes auch wirkliche elastische Spannungen in der Materie entsprechen. Es ist ja nicht möglich, daß in einer Flüssigkeit oder in einem Gase parallel zu den Linien des Feldes ein Zug und senkrecht dazu ein Druck herrscht. Die Flüssigkeit müßte dann in ewiger Bewegung sein, da Gleichgewicht nur vorhanden ist bei allseitig gleichem Druck. Um den elastischen Zustand der Körper im magnetischen Felde zu erhalten, sind zu den Maxwellschen Spannungen noch die sogenannten Ergänzungsspannungen hinzuzufügen (siehe 8 e).

8. Die magnetischen Kräfte. 8a) Prinzip der Kraftberechnung. Das allgemeine Prinzip für die Berechnung der magnetischen Kräfte, die auf einen Körper im Felde wirken, ist das, daß man den Körper um eine Strecke d verschoben denkt und die mit dieser Verschiebung verbundene Aenderung der magnetischen Energie berechnet. Da diese Aenderung nach 6d und 6e gleich der von den magnetischen Kräften geleisteten Arbeit ist, so erhält man aus ihr durch Division in die Verschiebung d die in der Richtung von d wirkende Kraftkomponente (Beispiele siehe 7a und 7b).

8b) Allgemeines Gesetz für die Bewegung von Körpern im Felde. Nach 6c wird die Energie eines statischen Feldes dadurch verkleinert, daß man an irgendeiner Stelle des Feldes die Permeabilität vergrößert, also in das im Vakuum (oder in Luft) bestehende Feld einen paramagnetischen Körper bringt. Die Energieabnahme hängt zusammen mit einer Störung des Verlaufes der Niveauflächen und 𝔐-Linien. Diese Störung aber wird um so beträchtlicher sein, je dichter die Linien an der Stelle sind, an die der Körper gebracht wird, denn eine umso größere Zahl der gesamten Linien wird dann von der Störung ergriffen. Die Energieabnahme ist also beträchtlicher, wenn der Körper an eine Stelle größerer Liniendichte gebracht wird, als an eine Stelle kleinerer. Bei einem diamagnetischen Körper tritt an Stelle der Energieabnahme eine Energiezunahme.

Nach Satz III (6d) wird sich daher in einem ungleichförmigen Felde ein Körper von grösserem μ als die Umgebung wenn möglich von Stellen kleinerer zu Stellen größerer Feldintensität bewegen, weil dadurch die Feldenergie kleiner wird und ihrem dem Gleichgewicht entsprechenden Minimalwerte zustrebt. Umgekehrt wird ein Körper von kleinerem μ als die Umgebung das Feld fliehen: ein Stück Wismut wird von einem Magneten abgestoßen.

In einem gleichförmigen Felde werden die Kräfte auf alle nicht ferromagnetischen Körper verschwindend klein. Zur experimentellen Untersuchung sind also starke, ungleichförmige Felder notwendig, wie die zwischen den zugespitzten Polen starker Elektromagnete (Fig. 18). Die stärksten, auf diese Weise hergestellten magnetischen Felder haben etwa 40 000 Gauß oder absolute Einheiten (vgl. den Artikel „Magnetfeld" S. 594).

Die Rechnung führt für alle nicht ferromagnetischen Körper von der Permeabilität μ zu folgender Formel für die Kraft K, die auf eine kleine Volumeinheit des Körpers wirkt und sie in Richtung der schnellsten Zunahme der 𝔋-Liniendichte zu bewegen sucht. Nennt man den Zuwachs von H^2 für die Längeneinheit den Gradienten von H^2, so ist

$$K = \frac{1}{2}(\mu - \mu_0). \text{ Gradient von } H^2. \quad . \quad . \quad . \quad 24)$$

μ_0 ist die Permeabilität der Umgebung.

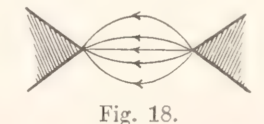


Fig. 18.

An Gasen und Flüssigkeiten läßt sich in Feldern wie Figur 18 leicht die Beobachtung machen, daß Teilchen von größerem μ die von kleinerem aus den Gebieten größter Feldstärke verdrängen. Bei festen nicht ferromagnetischen Körpern läßt sich über die Art der Bewegung etwas Bestimmtes nur aussagen bei besonderer Form des Körpers. Hat er längliche, etwa Stäbchenform, so stellt er sich in dem Felde Figur 18, wenn sein μ größer ist als das der Umgebung,

in die Richtung der $\mathfrak{H}$-Linien, andernfalls quer dazu. Von diesem Versuche rührt die Bezeichnung para- d. h. längs- und dia- d. h. quermagnetisch her.

In Gleichung (24) bedeutet ein negativer Wert von K eine Kraft, die die Volumeinheit in Richtung der schnellsten **Abnahme** der H-Linien dichte zu bewegen sucht. Ein und derselbe Körper kann sich danach para- und diamagnetisch verhalten, je nach der Umgebung, in die er gebracht wird. Eine Lösung von Eisenchlorid zeigt sich in einer schwächeren Lösung paramagnetisch, in einer stärkeren diamagnetisch, ganz ähnlich wie ein in eine Flüssigkeit getauchter Körper von der Erde angezogen oder scheinbar abgestoßen wird, je nachdem er spezifisch schwerer oder leichter ist als die Flüssigkeit.

Nach diesen Versuchen erscheint die Unterscheidung para- und diamagnetischer Körper willkürlich und nicht auf eine wesentliche Verschiedenheit gegründet (vgl. 3e).

Diese Bewegungsgesetze gelten selbstverständlich unabhängig davon, ob das Feld statisch oder elektromagnetisch ist.

8c) **Einstellung des Ellipsoids und Bewegung der Eisenfeilspäne.** Ein in das Feld gebrachter beliebiger Körper von anderer Permeabilität als die Umgebung erhält induzierte magnetische Mengen. Auf die induzierte Menge $\mathfrak{m}'$ wirkt im Felde H nach 3a die Kraft $\mathfrak{m}'.H$. Gelingt es also, für einen Körper die $\mathfrak{m}'$ zu ermitteln, so ist dadurch bei bekanntem Felde die Kraftwirkung auf ihn bestimmt. Hat

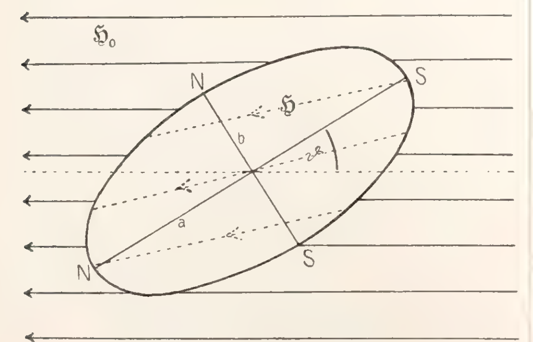


Fig. 19.

der Körper überall gleiches μ, so befinden sich die $\mathfrak{m}'$ nur auf seiner Oberfläche (vgl. diesen Artikel S. 670); sie sind der experimentellen Erforschung zugänglich und auch ihre theoretische Berechnung ist in einzelnen Fällen möglich. Hierher gehört besonders der Fall, daß der Körper ein Ellipsoid ist.

Wird ein solches in ein gleichförmiges Feld gebracht, so ist nach 5e das Feld $\mathfrak{H}$ im Innern und die induzierte Magnetisierung $\mathfrak{J}'$ ebenfalls gleichförmig. Figur 19 stelle den Grundriß des Ellipsoides in der Ebene zweier seiner Hauptachsen a, b dar, die dritte Hauptachse steht senkrecht darauf und um diese sei das Ellipsoid drehbar. H_0 sei das gleichförmige Feld, in das das Ellipsoid gebracht wird; dieses Feld bilde mit der Achse a den Winkel ϑ.

Das Feld $\mathfrak{H}$ im Innern (punktiert gezeichnet) werde in zwei Komponenten $\mathfrak{H}_a$ und $\mathfrak{H}_b$ parallel zu a und b zerlegt. Jede dieser Komponenten ruft eine mit ihr parallele induzierte Magnetisierung hervor, die nach 3d Gleichung (10), wenn μ die Permeabilität des Ellipsoids, μ_0 die des Vakuums ist, den Wert hat

$$J'_a = (\mu - \mu_0)\mathfrak{H}_a$$

$$\text{und } J'_b = (\mu - \mu_0)\mathfrak{H}_b.$$

Hat die Umgebung des Ellipsoids die Permeabilität μ_0 des Vakuums, was vorausgesetzt werde, so geben die Endpunkte der $\mathfrak{J}'$-Linien direkt die induzierten Mengen, andernfalls kommen dazu die Endpunkte der außen verlaufenden $\mathfrak{J}'$-Linien. Durch Multiplikation von J'_a und J'_b mit dem Volumen v des Ellipsoides erhält man die Komponenten $\mathfrak{K}'_a$ und $\mathfrak{K}'_b$ des gesamten induzierten Momentes nach den Achsen a und b. Die Berechnung von $\mathfrak{H}_a$ und $\mathfrak{H}_b$ gibt für $\mathfrak{K}'_a$ und $\mathfrak{K}'_b$ die Ausdrücke

$$\mathfrak{K}'_a = \frac{\mu_0 \, H_0 . v . \cos \vartheta}{\frac{\mu_0}{\mu - \mu_0} + A}$$

$$\mathfrak{K}'_b = \frac{\mu_0 \, H_0 . v . \sin \vartheta}{\frac{\mu_0}{\mu - \mu_0} + B},$$

wobei A und B Konstanten sind, die von der Form des Ellipsoides und zwar vom Verhältnis seiner Hauptachsen abhängen.

Das Ellipsoid besteht gewissermaßen aus zwei rechtwinklig gekreuzten Magneten, die ihre Nordenden bei NN und die Südenden bei SS haben. Für die Berechnung der Kraftwirkung kann

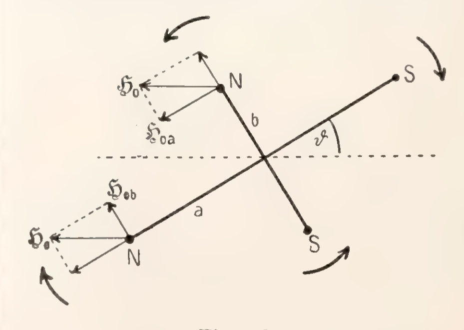


Fig. 20.

man annehmen (vgl. „Magnetfeld“ 4b), daß der Magnet, dessen Achse a ist, die magnetischen Mengen $+\frac{\mathfrak{K}'_a}{a}$ und $-\frac{\mathfrak{K}'_a}{a}$ [1]) in den Endpunkten der Achse trägt, und ebenso der Magnet mit der Achse b die Mengen $+\frac{\mathfrak{K}'_b}{b}$ und $-\frac{\mathfrak{K}'_b}{b}$. Zerlegt man $\mathfrak{H}_0$ in seine Komponenten nach a und b (Fig. 20)

---

[1]) + bedeutet Nord-, — Südmagnetismus (s. 3c).

$$\mathfrak{H}_{0a} = H_0 . \cos \vartheta$$
$$\mathfrak{H}_{0b} = H_0 . \sin \vartheta,$$

so übt $\mathfrak{H}_{0b}$ auf die Achse a ein Drehmoment aus, das den Winkel ϑ zu verkleinern sucht und die Größe hat

$$2 . \left(\frac{\mathfrak{K}'_a}{a} . \mathfrak{H}_{0b} . \frac{a}{2}\right) = \mathfrak{K}'_a . \mathfrak{H}_{0b};$$

ebenso $\mathfrak{H}_{0a}$ auf die Achse b ein Drehmoment, das ϑ zu vergrößern sucht, vom Betrage

$$2 . \left(\frac{\mathfrak{K}'_b}{b} . \mathfrak{H}_{0a} . \frac{b}{2}\right) = \mathfrak{K}'_b . \mathfrak{H}_{0a}.$$

Es resultiert also im ganzen ein Drehmoment Θ, das ϑ vergrößern will:

$$\Theta = \mathfrak{K}'_b . \mathfrak{H}_{0a} - \mathfrak{K}'_a . \mathfrak{H}_{0b}$$

$$= \mu_0 H_0^2 . v . \sin \vartheta \cos \vartheta . \left[\frac{1}{\frac{\mu_0}{\mu - \mu_0} + B} - \frac{1}{\frac{\mu_0}{\mu - \mu_0} + A}\right].$$

Die Gleichung enthält außer μ lauter meßbare Größen, kann also zur Bestimmung von Permeabilitäten dienen.

In unserem Falle, wo a größer ist als b, ist A kleiner als B, also der erste Nenner in der Klammer größer als der zweite und damit der ganze Klammerausdruck negativ, d. h. aber, das Drehmoment Θ wird negativ, es überwiegt das Drehmoment von $\mathfrak{H}_{0b}$ über das von $\mathfrak{H}_{0a}$, das Ellipsoid sucht sich mit seiner längeren Achse a in die Feldrichtung zu stellen. Dabei kann μ größer oder kleiner sein als μ_0. Im gleichförmigen Felde stellt sich jeder ellipsoidische oder ellipsoidähnliche längliche Körper, mag er para- oder diamagnetisch sein, mit seiner Längsrichtung parallel zum Feld.

Längliche Eisenfeilspäne, die als kleine Ellipsoide betrachtet werden können, stellen sich also, wenn man sie für Augenblicke durch Klopfen auf die Unterlage in die Höhe schnellt und so frei drehbar macht, in die Feldrichtung ein. In der Nähe der Pole, wo das Feld stark ungleichförmig ist, drehen sie sich nicht nur, sondern rutschen in der Richtung, in der das Feld am schnellsten wächst, fort (8b).

8 d) Tragkraft von Magneten. An die horizontale, genau ebene Polfläche SS (Fig. 21) eines permanenten oder Elektromagneten sei die gleichfalls genau eben geschliffene Fläche S'S' eines

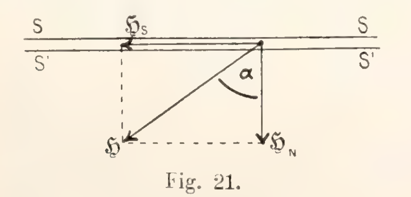


Fig. 21.

unmagnetischen Eisenstücks fest angedrückt. Es soll die Kraft berechnet werden, mit der der Magnet auf die Fläche S' anziehend wirkt. Zwischen den beiden Flächen S und S' befindet sich eine, in der Figur übertrieben dick gezeichnete, äußerst dünne Luftschicht, deren Permeabilität gleich μ_0 gesetzt werde. Die Permeabilität des Eisenstücks sei μ, die Feldstärke in dem Luftschlitz H_0, im Eisen H. Im allgemeinen werden die $\mathfrak{H}$-Linien durch den Luftschlitz teils senkrecht, teils unter verschiedenen Winkeln α gegen die Senkrechte geneigt hindurchtreten.

Im ersteren Falle wirkt auf die Flächeneinheit der Fläche S' ein senkrechter Zug z nach dem Magneten hin vom Betrage $\frac{1}{2}\mu_0 H_0^2$ (7 a und 7 c), und vom Magneten weg vom Betrage $\frac{1}{2}\mu H^2$, also ist die resultierende Anziehungskraft Z für die Flächeneinheit

$$Z = \frac{1}{2}\mu_0 H_0^2 - \frac{1}{2}\mu H^2$$

oder wenn man die Induktion $\mathfrak{B}$ einführt,

$$Z = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0} - \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu}.$$

Ist μ sehr groß gegen μ_0, so kann man auch angenähert schreiben.

$$Z = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu_0}.$$

Im zweiten Falle zerlege man die Feldstärke in zwei Komponenten, die eine (Index S) parallel zu S, die andere (Index N) senkrecht dazu. Die Normalkomponenten bewirken einen senkrechten Zug auf die Flächeneinheit zum Magneten hin vom Betrage

$$\frac{1}{2}\mu_0 \mathfrak{H}_0{}^2{}_N - \frac{1}{2}\mu \mathfrak{H}^2{}_N,$$

die Tangentialkomponenten einen Druck vom Betrage

$$-\frac{1}{2}\mu_0 \mathfrak{H}_0{}^2{}_S + \frac{1}{2}\mu \mathfrak{H}^2{}_S$$

(vgl. 7b). Die Addition ergibt mit Benutzung der beiden Beziehungen

$$\mathfrak{H}_{0S} = \mathfrak{H}_S$$
$$\mu_0 \mathfrak{H}_{0N} = \mu \mathfrak{H}_N$$

als gesamten auf die Flächeneinheit von S'S' senkrecht nach dem Magneten hin wirkenden Zug

$$Z = \frac{1}{2}(\mu - \mu_0) H_0^2 \left[1 - \frac{\mu - \mu_0}{\mu}\cos^2\alpha\right].$$

Durch Summation aller Zugkräfte Z auf die einzelnen Flächeneinheiten erhält man für den Fall, daß das Eisenstück außer S'S' in Gebieten beträchtlicher Feldstärke nur noch Oberflächenteile besitzt, die senkrecht zu SS liegen, die Tragkraft des Magneten für die betrachtete besondere Anordnung.

8 e) Magnetostriktion. Um die Maxwellschen Spannungen nach dem in 8a erörterten Prinzip zu erhalten, muß man die Voraussetzung machen, daß bei den gedachten Verschiebungen im Felde keine Form- oder Dichteänderungen fester Körper und keine Dichteänderungen von Flüssigkeiten oder Gasen stattfinden — oder wenigstens, daß im Falle solcher Aenderungen die Permeabilität μ keine Veränderung erfährt. Das heißt die Maxwellschen Spannungen würden zur Darstellung der mechanischen Vorgänge im Felde allein ausreichen, wenn alle festen Körper vollkommen starr und nebst den Flüssigkeiten und Gasen nicht zusammendrückbar oder ausdehnbar wären, oder wenn μ unabhängig wäre von Form und Dichte.

Erfahrungsgemäß ändert sich nun die Permeabilität fester Körper bei Form- und Dichteänderungen, während sie sich bei Flüssigkeiten und Gasen naturgemäß nur mit der Dichte, dem Volumen verändern kann. Die Maxwellschen Spannungen bedürfen daher für die Berechnung der elastischen Deformationen einer Ergänzung, die sich aus folgender Ueberlegung ergibt.

Angenommen, die Permeabilität eines Körpers nehme bei Volumvergrößerung ab. Dann nimmt dabei nach 6c — ein statisches Feld vorausgesetzt — die magnetische Feldenergie zu. Bei der Volumvergrößerung ist also Arbeit gegen gewisse magnetische Kräfte zu leisten, der Arbeitsbetrag ist gleich der Zunahme der magnetischen Energie, und jene magnetischen Kräfte suchen ihrerseits das Körpervolumen zu verkleinern, den Körper zusammenzudrücken, da hierbei die Feldenergie abnimmt und ihrem Gleichgewichtswerte zustrebt (6 d). Diese aus der Veränderlichkeit der Permeabilität mit Form und Dichte hervorgehenden magnetischen Kräfte sind die Ergänzungen der Maxwellschen Spannungen.

Bei einer Flüssigkeit kann sich, wie erwähnt, die Permeabilität nur durch Aenderung des Volumens verändern. Die Ergänzungsspannungen müssen also hier in allseitig gleichen Druckkräften bestehen, die den allseitig wirkenden, ohne magnetisches Feld vorhandenen hydrostatischen Druck entweder vergrößern oder verkleinern. Nimmt das μ einer Flüssigkeit durch Ausdehnung ab, also die Feldenergie zu, so wird im Felde jeder Teil der Flüssigkeit sich mit einer gewissen Kraft zusammenzuziehen suchen, m. a. W. der hydrostatische Druck, den der Teil der Flüssigkeit auf seine Umgebung ausübt, wird kleiner werden. Die Flüssigkeit wird sich zusammenziehen und zwar so lange, bis die dadurch hervorgerufenen elastischen Kräfte den magnetischen Kräften das Gleichgewicht halten. Umgekehrt wird sich eine Flüssigkeit, deren μ bei der Ausdehnung wächst, auszudehnen streben; jeder Teil der Flüssigkeit übt also auf seine Umgebung im magnetischen Feld einen größeren hydrostatischen Druck aus als ohne Feld.

Die Rechnung ergibt, daß im Felde H ein allseitig gleicher Druck p vom Betrage

$$p = \frac{1}{2}\,\delta\,.\,H^2$$

zu dem ohne Feld vorhandenen hydrostatischen Drucke hinzukommt, wobei der Faktor δ folgende Bedeutung hat. Sei μ die Permeabilität der Flüssigkeit ohne Feld, μ' die im Felde, ϑ die sogenannte räumliche Dilatation, d. h. die Vergrößerung der Volumeinheit; dann kann man für sehr kleine Dilatationen annehmen, daß die Aenderung von μ in direktem Verhältnis zu ϑ steht, also

$$\frac{\mu' - \mu}{\vartheta} = \delta$$

ist. D. h. die Größe δ ist positiv, wenn μ mit der Ausdehnung wächst, negativ im umgekehrten Falle. Im ersten Falle ist p positiv und die Flüssigkeit dehnt sich im Felde aus, im zweiten ist p negativ und die Flüssigkeit zieht sich zusammen.

Da das μ der Flüssigkeiten sehr klein und also auch seine Aenderung mit dem Volumen verschwindend ist, so ist hier die experimentelle Prüfung der Theorie sehr schwierig und sichere Resultate sind wegen der mannigfaltigen Fehlerquellen schwer zu erzielen. Die vorliegenden Versuche deuten darauf hin, daß bei Eisenchloridlösung im Felde eine Volumenverkleinerung stattfindet.

Bei festen Körpern wird im allgemeinen eine Ausdehnung oder Zusammenziehung in Richtung der $\mathfrak{H}$-Linien einen anderen Einfluß auf die Permeabilität haben, als die entsprechenden Formänderungen in einer dazu senkrechten Richtung. Bezeichnet man die Konstanten, die die Aenderung des μ mit der Ausdehnung der Längeneinheit parallel und senkrecht zum Feld angeben, mit δ_1 und δ_2, so ergibt die Rechnung für nicht ferromagnetische Körper einen Druck parallel zum Felde $\mathfrak{H}$ vom Betrage

$$p_1 = \frac{1}{2}\,\delta_1\,H^2$$

und einen Druck senkrecht dazu vom Betrage

$$p_2 = \frac{1}{2}\,\delta_2\,H^2.$$

Die Resultate der wenigen vorliegenden Versuche stehen zum Teil in Widerspruch miteinander und lassen also keine bestimmten Aussagen zu.

Für ferromagnetische Körper werden die theoretischen Formeln dadurch komplizierter, daß die Größen δ zugleich mit μ von der Feldstärke abhängig werden. Eine strenge Prüfung der Theorie ist auf Grund der sehr zahlreichen, namentlich in jüngster Zeit angestellten Versuche noch nicht möglich, doch sind durch diese Versuche Form- und Volumänderungen ferromagnetischer Körper im magnetischen Felde einwandfrei festgestellt und ihre Abhängigkeit von der Feldstärke eingehend untersucht (s. Literatur 12).

Literatur. *1. Der Versuch rührt von* ***Hele-Shaw*** *her und ist unter dem Titel „Ueber die Stromlinienmethode der Untersuchung zweidimensionaler magnetischer Probleme" in der Physikal. Zeitschrift 6 S. 290 1905 von* ***Hay*** *näher beschrieben. — 2. Tabellen für* $\frac{\mu}{\mu_0}$ *siehe z. B. in* ***Kohlrausch,*** *Lehrbuch der praktischen Physik, 11. Aufl., Leipzig und Berlin 1910;* ***Landolt*** *und* ***Börnstein,*** *Physikalisch-chemische Tabellen, 3. Aufl., Berlin 1905. — 3.* ***J. A. Ewing,*** *Magnetische Induktion in Eisen und verwandten Metallen, S. 277, Berlin und München 1892. — 4.* ***P. Weiss,*** *L'hypothèse du champ moléculaire et la propriété ferromagnétique. Journal de physique (IV) 6, S. 661; 1907. — 5.* ***P. Langevin,*** *Sur la théorie du magnétisme, Journal de physique (IV) 4, S. 678; 1905. — 6.* ***P. Weiss,*** *l. c. — 7.* ***R. Gans,*** *Göttinger Nachrichten 1910, S. 197 und 1911, S. 1. — 8.* ***W. Voigt,*** *Elektronenhypothese und Theorie des Magnetismus, Annalen der Physik (IV) 9, S. 115; 1902. — 9.* ***J. C. Maxwell,*** *Ueber Faradays Kraftlinien, Ostwalds Klassiker Nr. 69. — 10.* ***Derselbe,*** *Ueber physikalische Kraftlinien, Ostwalds Klassiker, Nr.*

102. — **L. Boltzmann**, *Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektrizität und des Lichtes, Leipzig 1891, 1893.* — **H. Ebert,** *Magnetische Kraftfelder 2. Aufl., Leipzig 1905.* — *11.* **Derselbe,** *l. c.* — **Abraham-Föppl,** *Einführung in die Maxwellsche Theorie der Elektrizität, 3. Aufl., Leipzig 1907.* — *12. Näheres bei* **F. Pockels** *in Grunerts Archiv der Mathematik und Physik, Bd. 12, S. 57; 1894 und Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften V 2, S. 369; 1907.* — **Winkelmann,** *Handbuch der Physik, V, S. 323, Leipzig 1908.*

G. Aeckerlein.

Magnetische Messungen.

A. Allgemeine Uebersicht. 1. Ziel magnetischer Messungen. 2. Für die Messung besonders wichtige magnetische Felder: a) Feld einer unendlich langen Spule ohne Eisen. b) Feld einer unendlich langen Spule mit Eisen. c) Feld einer Spule endlicher Länge ohne Eisen. d) Feld einer Spule endlicher Länge mit Eisen. e) Feld eines magnetischen Ellipsoides. f) Feld eines Ringes ohne Eisen. g) Feld eines Ringes mit Eisen. 3. Der magnetische Kreis. B. Bestimmung eines magnetischen Feldes außerhalb magnetisierbarer Stoffe. 4. Bestimmung des magnetischen Feldwertes an einer einzelnen Stelle im Raum. a) Vergleich mit einem bekannten Felde nach der ballistischen Methode. b) Experimentelle Bestimmung der Windungsfläche. c) Messung des Feldes mit der Wismutspirale. 5. Bestimmung eines räumlich ausgedehnten magnetischen Feldes außerhalb von magnetisierbaren Körpern. 6. Messung des Erdfeldes: a) Messung des Produktes MH. b) Messung des Quotienten $\frac{M}{H}$. C. Bestimmung des Zusammenhanges von $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ bei magnetisierbaren Stoffen. 7. Messungen am Ringe: a) Nullkurve. b) Kommutierungskurve. c) Hystereseschleife. 8. Messungen am Ellipsoid. 9. Die Jochmethode. 10. Der Köpselsche Apparat. 11. Die Wage von Du Bois. 12. Messung sehr hoher Induktionen. 13. Messung der Permeabilität an Epstein-Bündeln. D. Magnetische Messungen im Wechselfelde. 14. Messung der Induktion. 15. Messung der Permeabilität. 16. Verlustmessungen.

A. Allgemeine Uebersicht.

1. Ziel magnetischer Messungen. Ein magnetisches Feld ist bestimmt, wenn wir an jeder Stelle des Raumes die magnetische Induktion $\mathfrak{B}$ und die magnetische Feldstärke $\mathfrak{H}$ angeben können.[1]) Das Feld $\mathfrak{B}$ ist die Ursache der Induktionserscheinungen. Wir orientieren eine Drahtschleife S (Fig. 1) von n_s Windungen, die je die Fläche F umschließen, senkrecht zu den Induktionslinien und fassen den Induktionsfluß Φ dieser Schleife ins Auge ($\Phi = Bn_sF$). Verschwindet das Feld und mit ihm der Induktionsfluß, so wird während der Dauer dieses Vorganges in der Schleife S eine elektromotorische Kraft (EMK) induziert. Die Zeitsumme E der induzierten EMK e (Summe der Produkte aus Zeitelement dt und momentan induzierter EMK e; $E = \int e\,dt$) hat die Größe:

$$E = Bn_sF.10^{-8} \text{ Volt sec.} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 1)$$

Besteht die Drahtschleife aus einer einzigen Windung, die eine Fläche von 1 cm^2 umrandet, und beträgt beim Verschwinden

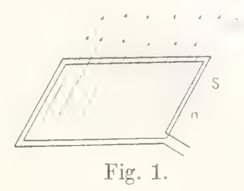


Fig. 1.

des Feldes die Zeitsumme der induzierten EMK gerade 10^{-8} Volt sec, so hat das Feld $\mathfrak{B}$ die Größe 1 gehabt.

Dagegen versteht man unter dem Felde $\mathfrak{H}$ die Ursache der auf „wahren" Magnetismus wirkenden mechanischen Kraft. Bringt man nur den Nordpol eines idealen sehr langen permanenten Magneten mit punktförmigen Polen von der Stärke 1 in den Bereich des zu untersuchenden Feldes, während der Südpol außerhalb desselben bleibt, und erfährt der Nordpol alsdann eine Kraftwirkung von einer Dyne, so hat das magnetische Feld $\mathfrak{H}$ daselbst die Stärke 1. In der Praxis benutzt man häufig nicht die hier definierte elektromagnetische Einheit der Feldstärke, sondern eine Einheit, die $0{,}4\pi$ (=1,256) mal so groß ist und die die Bezeichnung Aw/cm (Amperewindungen pro cm) trägt. Hat man somit auf irgendeinem Wege gefunden, daß einem Felde $\mathfrak{H}$ die Größe von Z Aw/cm zukommt, so hat dasselbe Feld im elektromagnetischen Maßsystem eine Maßzahl von Z. 1,256 (s. hierzu Formel 2).

Eigentümlicherweise sind die Größen beider Vektoren $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ nicht unabhängig voneinander. Streng nur für den leeren Raum praktisch jedoch für viele sogenannte nicht magnetisierbare Stoffe (Luft) stimmen im elektromagnetischen Maßsystem die Maßzahlen B und H überein. Bei (praktisch) nicht magnetisierbaren Stoffen hat man daher zur Bestimmung eines magnetischen Feldes nur eine einzige der beiden Größen $\mathfrak{B}$ oder $\mathfrak{H}$ zu messen (Abschnitt B).

Bei magnetisierbaren Körpern weichen indessen die Maßzahlen B und H merklich voneinander ab. Manchmal ergibt sich der Quotient von $\frac{B}{H} = \mu$, den man die Permeabilität des Materials nennt, als eine

---

[1]) Für die Vektoren sind deutsche, für die Länge derselben lateinische Buchstaben verwendet.

Konstante. Im allgemeinen jedoch namentlich bei den ferromagnetischen Stoffen (Eisen, Nickel, Kobalt, Heuslersche Legierungen) ist die Beziehung zwischen B und H nicht nur eine komplizierte Funktion, sondern sogar von der magnetischen Vorgeschichte abhängig. Man nennt die Kurve, die die Verknüpfung von B und H graphisch darstellt, die Magnetisierungskurve des Materials. Vorzugsweise werden hiervon die Nullkurve, die Kommutierungskurve und die Hystereseschleife in Betracht gezogen (vgl. auch die Artikel „Magnete" und „Magnetische Felder").

Bei magnetisierbaren Körpern muß man somit zur Angabe des magnetischen Feldes beide Größen $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ bestimmen. In vielen Fällen unterzieht man sich dieser Aufgabe (s. unter C) jedoch nicht sowohl mit der Absicht, um das magnetische Feld, sondern um die magnetische Materialeigenschaft des Stoffes: seine Magnetisierungskurve kennen zu lernen.

Beim veränderlichen Felde beanspruchen außer den vorigen Größen noch die infolge von Hysterese und Wirbelströmen eintretenden Energieumsetzungen das Intersese (s. Abschnitt D).

2. Für die Messung besonders wichtige magnetische Felder. 2a) Feld einer unendlich langen Spule ohne Eisen.

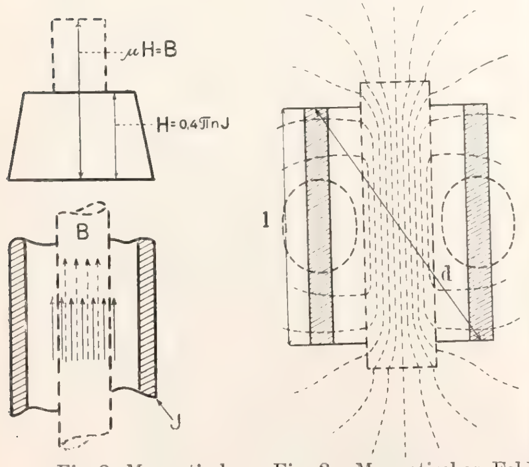


Fig. 2. Magnetisches Feld einer unendlich (oder) langen Spule.

Fig. 3. Magnetisches Feld einer Spule endlicher Länge.

Schickt man durch eine sehr (unendlich) lange röhrenförmige gleichmäßig gewickelte Spule einen Strom von J Ampere, so entsteht im Innern der Spule ein homogenes Feld. Die Kraftlinien laufen der Achse parallel. Außerhalb der Spule ist kein Feld vorhanden. Innerhalb des Wickelraumes sinkt das Feld geradlinig auf Null herab (ausgezogene Kurve, Fig. 2). Der Wert der Feldstärke H oder der Induktion B für das Spuleninnere wird bei N Windungen pro cm durch den Ausdruck:

$$H = B = 0{,}4\,\pi\,NJ \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 2)$$

gegeben.

2b) Feld einer unendlich langen Spule mit Eisen. In die Spule soll nun ein unendlich langer zylindrischer Stab aus magnetisierbarem Material (Eisen) gebracht werden. An dem Felde $\mathfrak{H}$ ändert dies nichts. Das gleiche gilt von dem Felde $\mathfrak{B}$ außerhalb des Stabes. Im Innern des Stabes wächst aber das Feld $\mathfrak{B}$ auf den μ-fachen Wert des Betrages 2) an (gestrichelte Kurve, Fig. 2).

2c) Feld einer Spule endlicher Länge ohne Eisen. Je kürzer eine Spule im Verhältnis zu ihrer Oeffnung ist, desto weniger darf man ihr Feld als homogen betrachten. Ist umgekehrt die Spule sehr lang im Verhältnis zu ihrer Oeffnung, so kann man das Feld bis auf eine gewisse Umgebung der Enden praktisch noch als homogen ansehen. Das Feld ist daselbst ein klein wenig schwächer als das Feld der unendlich langen Spule. Es hat den Wert:

$$H = B = 0{,}4\,\pi\,NJ\,\frac{l}{d} \quad . \; . \; . \; . \quad 3)$$

(l = Länge der Spule; d = Diagonale ihres Längsdurchschnittes. Fig. 3).

2d) Feld einer Spule endlicher Länge mit Eisen. Bringen wir in die endliche Spule einen Eisenstab, so erfährt nicht nur die Induktion $\mathfrak{B}$, sondern auch die Feldstärke $\mathfrak{H}$ im Gegensatz zu dem Falle b) eine gründliche Aenderung. Man kann sich dies folgendermaßen erklären. Mit dem in Fig. 3 und 4 gezeichneten Bild der Induktion $\mathfrak{B}$, das lauter in sich geschlossene Kraftlinien enthält, stimmt das Bild der Feldstärke $\mathfrak{H}$ außerhalb des Eisens völlig überein. Innerhalb des Eisens muß man aber zur Abbildung der Feldstärke $\mathfrak{H}$ nur den μ-ten Teil der Linien zeichnen. Das Bild der Feldstärke $\mathfrak{H}$ enthält daher nicht lauter in sich geschlossene Kraftlinien, sondern ein Teil derselben entspringt oder endigt auf der Eisenoberfläche. Die Ursache dieses singulären Verhaltens kann man nun positiven und negativen Belegungen auf der Eisenoberfläche zuschieben. Bei der unendlich langen Spule (Fall b) rückten diese Belegungen ins Unendliche und von ihrer Wirkung im Endlichen war daher nichts zu spüren. Hier aber erzeugen sie ein beträchtliches Zusatzfeld $\mathfrak{H}_z$, das sich über das unter c) betrachtete Feld $\mathfrak{H}_s$ herüberlagert. Das wirkliche und in letzter Linie allein in Betracht kommende Feld $\mathfrak{H}$ ist die Summe $\mathfrak{H} = \mathfrak{H}_s + \mathfrak{H}_z$. Den rohen Zügen nach stimmt das Zusatzfeld $\mathfrak{H}_z$ für

Partien in der Mitte des Stabes (nicht am Ende desselben) überein mit dem Felde von zwei punktförmigen nahe den Stabenden gelegenen Polen. Das Zusatzfeld $\mathfrak{H}_z$ wirkt im Innern des Stabes dem Felde $\mathfrak{H}_s$ der Spule entgegen. Das wirkliche Feld $\mathfrak{H}$ im magnetischen Stabe ist daher kleiner als das anregende Feld $\mathfrak{H}_s$ der Spule ohne Eisen (entmagnetisierende Wirkung der Stabenden).

2e) Feld eines magnetischen Ellipsoides (vgl. den Artikel „Magnetische Influenz"). Die genaue Berechnung des Zusatzfeldes $\mathfrak{H}_z$ ist im allgemeinen undurchführbar; aber für den Fall eines Rotationsellipsoides Neumann geglückt. Bringt man ein Ellipsoid in ein homogenes Feld (Spulenfeld, s. auch Fig. 12) von der Stärke $\mathfrak{H}_s$, so wird das Ellipsoid ebenfalls homogen

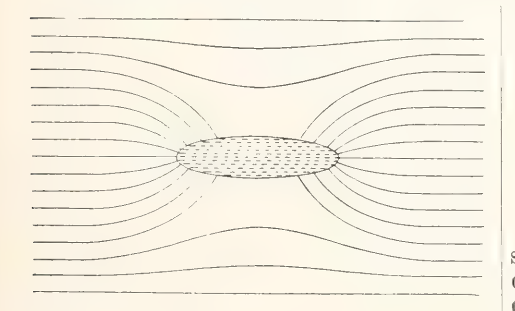


Fig. 4. Ellipsoid im homogenen Magnetfeld.

magnetisiert. Die Abbildung des Feldes der Induktion $\mathfrak{B}$ zeigt Figur 4. Das Zusatzfeld H_z hat die Größe

$$H_z - \gamma . (B - H) \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 4)$$

$$\text{wo } \gamma = \left[\frac{1}{\varepsilon^2} - 1\right] \left[\frac{1}{2\varepsilon} \ln \frac{1+\varepsilon}{1-\varepsilon} - 1\right] \quad . \; . \; . \quad 5)$$

$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$ = der Elektrizität des Ellipsoids.

Der Faktor γ heißt Entmagnetisierungskoeffizient. Für ein gestrecktes Ellipsoid $\frac{a}{b} = 40$ hat er z. B. den Wert: 0,0021; bei gedrungener Form $\frac{a}{b} = 5$ z. B. den Wert: 0,055.

Die wirkliche Feldstärke H im Innern des Ellipsoides ist daher:

$$H = H_s + H_z = 0{,}4\pi \, N . \frac{Jl}{d} - \gamma (B - H) . \; . \; . \quad 6)$$

Die Größe B—H wird häufig gleich $4\,\pi$ I gesetzt, wobei I die Magnetisierung genannt wird. Man kann sie beim Ellipsoid (s. 8) direkt messen.

2f) Feld eines Ringes ohne Eisen. Bei einem gleichförmig dicht bewickelten Ringe (Fig. 5) verlaufen die magnetischen Kraftlinien nur innerhalb des von Wickelung eingeschlossenen Bereiches und zwar in Kreisen um die Ringachse. Die Feldstärke beträgt: $H = \frac{0{,}2 \, n \, J}{r}$ wo n die Gesamtzahl der Windungen und r den Ab-

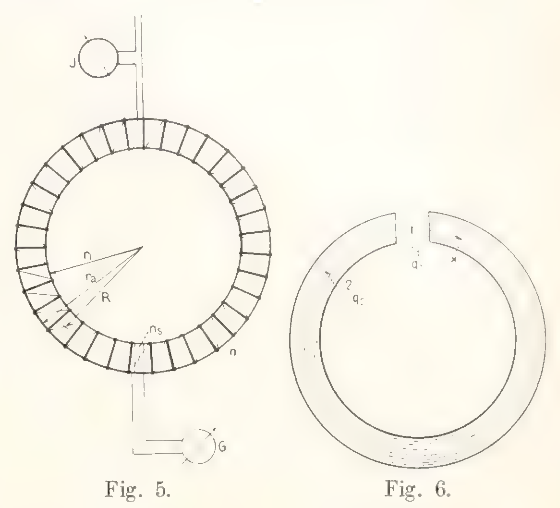


Fig. 5. Fig. 6.

stand des Punktes von der Ringachse bedeutet. Offenbar ist das Feld im Innern der Ringspule nicht ganz homogen. Es schwankt zwischen dem Wert $H_{max} = \frac{0{,}2 n J}{r_{min}}$ und $H_{min} = \frac{0{,}2 \, n \, J}{r_{max}}$. Im Mittel beträgt es:

$$H = \frac{0{,}2 n J}{R} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad 7)$$

2g) Das Feld eines Ringes mit Eisen. Füllen wir diesen Ring ganz mit Eisen aus, so haben die Induktionslinien keinen Anlaß aus dem Eisen auszutreten. Magnetische Belegungen bilden sich nicht. Das magnetische Feld $\mathfrak{H}$ bleibt daher ungeändert wie vorhin. Die Induktion $\mathfrak{B}$ steigt wieder wie im Falle b) auf den μ-fachen Betrag.

3. Der magnetische Kreis. Wir betrachten irgend ein durch Ströme magnetisiertes Eisenstück etwa einen geschlitzten Ring und entwerfen dem Gefühl nach ein Kraftlinienbild der Induktion. Dieses wird, von gewissen Feinheiten in der Nähe des Schlitzes abgesehen, aus konzentrischen Kreisen bestehen (Fig. 6). Es werde eine bestimmte etwa die durch die Mitte des Querschnittes gehende Kraftröhre betrachtet. Für sie bleibt der Kraftfluß an allen Stellen konstant. Aus diesem Grunde muß für die Stellen 1 und 2 (1 im Schlitz; 2 im Eisen gelegen) $B_1 q_1 = B_2 q_2$ (q = Querschnitt)

sein und weiter $H_1 = \frac{\mu_2}{\mu_1} H_2 . \frac{q_2}{q_1}$, wo μ_1 für den Schlitz (Luft) den Wert 1 hat. Für die in der Querschnittsmitte des Ringes gelegene Kraftröhre ist angenähert $q_1 = q_2$ und es folgt somit:

$$H_1 = \mu_2 H_2$$

Die Feldstärke $\mathfrak{H}$ im Schlitz ist daher μ mal so groß wie im Eisen.

Nehmen wir nun den Wert der Feldstärke $\mathfrak{H}$ an irgend einer Stelle etwa an der Stelle 1 als gegeben an, so ist die Feldstärke an irgend einer Stelle x der betrachteten Kraftröhre bestimmt durch: $H_x = \frac{\mu_1}{q_x} H_1 \frac{q_1}{\mu_x}$. Nun muß aber die Liniensumme der magnetischen Kraft $\mathfrak{H}$ nach dem 1. Maxwellschen Grundgesetz in integrierter Form gleich 0,4 π mal der Anzahl der umschlungenen Amperedrähte sein (s. den Artikel Magnetisches Feld). Somit hat man:

$$\int H_x d_x = H_1 q_1 \mu_1 W = 0{,}4 \pi n J \quad . \quad . \quad 8)$$

wo das Integral $\int \frac{d_x}{q_x \mu_x} = W$ über die ganze geschlossene Kraftröhre zu erstrecken ist. Gewöhnlich schreibt man 8) in der Form $d\Phi = \frac{0{,}4 \pi n J}{W}$, denn $H_1 \mu_1 q_1$ ist nichts anderes als der Kraftfluß $d\Phi$ der ins Auge gefaßten Kraftröhre. Werden von einer Magnetisierungswickelung eine Gruppe von Kraftröhren erzeugt, die sämtlich alle Windungen der Magnetisierungswickelung durchsetzen, so gilt infolge einer einfachen Summation:

$$\Phi = \frac{0{,}4 \pi n J}{W} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9)$$

wobei jetzt in dem Integral für q_x der Querschnitt des ganzen Kraftröhrenbündels einzusetzen ist.

Bei vorgegebenem Kraftlinienbilde und vorgegebenem Werte der Induktion an irgend einer Stelle ist die Induktion an allen übrigen Stellen und mit ihr die Permeabilität an allen übrigen Stellen bestimmt. Unter diesen Voraussetzungen kann alsdann der magnetische Widerstand berechnet werden. In diesem Fall setzt uns die Gleichung 9) in den Stand, die zugehörige Zahl der Amperewindungen zu finden.

Um über die Größe des magnetischen Widerstandes eine Vorstellung zu gewinnen, denken wir uns an Stelle jeder Induktionsröhre einen fadenförmigen elektrischen Leiter von genau denselben geometrischen Abmessungen und legen jeder Stelle des Raumes der elektrischen Leitfähigkeit den Wert bei, den die Permeabilität daselbst hat. Dann stimmen der elektrische Widerstand des fadenförmigen Leiters und der magnetische Widerstand der betrachteten Kraftröhre überein.

Das Gesetz des magnetischen Kreises spielt dadurch eine Rolle bei magnetischen Meßanordnungen, weil es leicht über die Querschnittsverhältnisse Auskunft gibt, wenn der magnetische Widerstand eines Konstruktionsteiles gegen den eines anderen vernachlässigbar klein gemacht werden soll (Joch, Köpselscher Apparat, Du Boissche Wage). Und hier gilt:

Der magnetische Widerstand ist um so kleiner, je größere Querschnitte dem Kraftflusse geboten werden, je kleinere Luftstrecken er durchsetzen muß und je größer die Permeabilität ist.

Wir haben vorhin gar nicht von magnetischen Belegungen gesprochen. Dennoch vertragen sich die eben mit Hilfe des Gesetzes vom magnetischen Kreise gefundenen Ergebnisse mit den Resultaten, die unter Zuhilfenahme von magnetischen Belegungen gefunden werden können (s. 2d). Bei dem magnetischen Kreise fassen wir die wirklichen Felder $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ ins Auge. Ihre Eigenschaften: 1. Der Fluß einer Kraftröhre ist überall konstant; 2. Die Liniensumme der magnetischen Kraft $\mathfrak{H}$ ist gleich 0,4 π n J genügen, wie eben gezeigt, um diese Größen selbst zu bestimmen.[1]) Dagegen müßten wir beim Festhalten an der Betrachtung magnetischer Belegungen unsere Aufmerksamkeit zunächst nicht auf das wirkliche Feld $\mathfrak{H}$, sondern auf das Feld $\mathfrak{H}_s$ der Spule ohne Eisen richten. Der zweite Schritt besteht in der Bestimmung der Größe der magnetischen Belegungen. Diese befinden sich beim geschlitzten Ringe wesentlich auf den Schlitzflächen und in unmittelbarer Nähe derselben. Nun hätten wir das Feld $\mathfrak{H}_z$ der Belegungen aufzusuchen. Den rohen Zügen nach verstärkt es das Feld im Schlitz und schwächt es im Eisen (s. auch unter 2d). Könnten wir diese durchaus nicht einfache Aufgabe genauer lösen, so würden wir durch Zusammensetzung der Felder $\mathfrak{H}_s$ und $\mathfrak{H}_z$ zum wirklichen Felde $\mathfrak{H}$ und schließlich zur gesuchten Induktion gelangen.

Im allgemeinen führt die Betrachtung mit Hilfe des magnetischen Kreises viel schneller zum Ziel als die Vorstellung mit Hilfe der magnetischen Belegungen.

B. Bestimmung eines magnetischen Feldes außerhalb magnetisierbarer Stoffe.

4. Bestimmung des magnetischen Feldwertes an einer einzelnen Stelle im Raume.

4a) Vergleich mit einem bekannten Felde nach der ballistischen Methode. Wir bringen an die ins Auge gefaßte Stelle des

[1]) Vorausgesetzt, daß der Entwurf des Kraftlinienbildes nicht verfehlt war.

Raumes eine kleine Probespule; orientieren sie senkrecht zu den Kraftlinien (s. auch 5) und verbinden die Enden mit einem ballistischen Galvanometer G (Fig. 7). Man lasse nun das Feld plötzlich verschwinden, was durch Ausschalten des Feldstromes, Herausschnellen der Spule aus dem Bereich des Feldes, Herumklappen der Spule

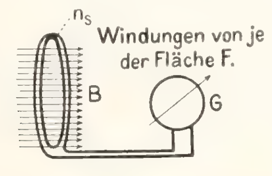


Fig. 7.

in die Ebene der Kraftlinien, geschehen kann. In allen diesen Fällen ist die Gesamtänderung des Flusses $\Delta\Phi = Bn_s F$. Im ballistischen Galvanometer möge der Ausschlag α hervorgerufen werden. Die durch das Galvanometer fließende Elektrizitätsmenge hat dann den Wert $C\alpha$, wenn C die Elektrizitätsmenge in Coulomb beim Ausschlag 1 bedeutet. Ist W der Widerstand von Galvanometer, Zuleitungen und Probespule in Ohm, so beträgt die Zeitsumme der induzierten EMK $C\alpha W$ Voltsec. und nach der Definition der Einheit der Induktion (1) gilt:

$$B = \frac{C\alpha w}{n_s F} \cdot 10^8 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 10)$$

Wir bringen nun dieselbe Probespule in genau derselben Schaltung in das Feld einer sorgfältig gewickelten sehr langen zylindrischen Röhre (Normalspule; 2c) und messen den Strom J, der durch die Spulenwickelung fließt. Beim Kommutieren des Stromes J werde jetzt im ballistischen Galvanometer der Ausschlag α' hervorgebracht. Dann ist (vgl. Fig. 3 und Formel 3)):

$$C\alpha' w = 2 . H_s . n_s F . 10^{-8} = 2 . 0{,}4\pi N . J . \frac{1}{d} . n_s F \, 10^{-8}$$

und es folgt aus beiden Versuchen:

$$B = 2 \cdot \frac{\alpha}{\alpha'} \cdot 0{,}4\pi . N . J \cdot \frac{1}{d} = 2 . \frac{\alpha}{\alpha'} \cdot H_s \quad . \quad . \quad . \quad 11)$$

Für starke magnetische Felder eignen sich an Stelle von Normalspulen besser von Ganz und Gmelin angegebene Etalons aus einem geschlitzten Eisenringe (Fig. 6).

Hat man keine Normalspule, so muß man die einzelnen Größen der rechten Seite der Gleichung 10) bestimmen. Die Konstante C und den Widerstand W können durch elektrische Messungen, die an anderer Stelle beschrieben sind (vgl. die Artikel „Strommessung" und „Widerstand"), gefunden werden. Die Windungszahl n_s kann man durch Auszählen, den Querschnitt F durch mechanische Ausmessung erhalten.

4b) Experimentelle Bestimmung der Windungsfläche. Die eben vorgeschlagene Bestimmung der Windungsfläche (des Produktes $n_s F$) ist mühselig, wenig genau und bei sehr vielen Windungen überhaupt illusorisch. Diese Aufgabe wird daher besser durch eine elektrische Messung gelöst. Zu dem Zweck bringt man die an das ballistische Galvanometer G (Fig. 7) angeschlossene Probespule in die Mitte einer Normalspule (s. 2c). Bei der Kommutierung des Stromes J der Spule beträgt die Aenderung des Induktionsflusses der Probespule:

$$\Delta\Phi = 2 . H_s . n_s F = 2 . n_s F . 0{,}4\pi . N J \cdot \frac{1}{d}$$

Ist der beobachtete Ausschlag des ballistischen Galvanometers wieder α, so gilt:

$$C\alpha w = 2 n_s F . 0{,}4\pi N J . \frac{1}{d} 10^{-8}$$

daraus folgt:

$$n_s F = \frac{C\alpha w}{0{,}8 . \pi . N J} \frac{d}{1} 10^8 = \frac{C\alpha w . 10^8}{2 H_s} \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

Setzt man den so gefundenen Wert der Windungsfläche in die Formel 10) ein, so kann man sich die zweite Messung mit der Normalspule unter 4a) sparen. Trotzdem würde auch jetzt noch diese Methode in der gekürzten Form auf den Vergleich eines unbekannten Feldes mit einem bekannten Felde H_s hinauslaufen.

Besitzt man aber bereits eine bekannte Windungsfläche $n'_s F'$, so schalte man mit dieser die zu vergleichende Windungsfläche hintereinander und bringe erst die eine und dann die andere an dieselbe Stelle einer Normalspule und bestimme jedesmal die Ausschläge im ballistischen Galvanometer beim Kommutieren desselben Stromes J. Für diesen Fall gilt:

$$n_s F = n'_s F' \cdot \frac{\alpha}{\alpha'} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

4c) Messung des Feldes mit der Wismutspirale. Wird bei starken Feldern (Feld im Luftspalt elektrischer Maschinen) an die Genauigkeit der Messung keine hohe Anforderung gestellt, so kann eine Wismutspirale sehr bequeme Dienste leisten. Eine Wismutspirale ändert nämlich, wenn sie in ein magnetisches Feld gebracht wird, ihren Widerstand (longitudinaler Halleffekt). Hat man nur ein einziges Mal empirisch die Beziehung zwischen Stärke des Feldes und Größe der Widerstandsänderung festgestellt, so kann man rückwärts aus beobachteter Widerstandsänderung auf die Stärke des Feldes schließen. Die Widerstandsmessung geschieht in der bekannten Wheatstonschen Brückenanord-

nung (s. „Strommessung“ und „Widerstand“). Da auch die Temperatur der Spirale von Einfluß auf den Widerstand ist, so muß sie berücksichtigt werden. Hartmann und Braun, Frankfurt a. M., die solche Wismutspiralen in den Handel bringen, geben daher jeder Spirale eine Eichtabelle und eine Vorschrift über die infolge der Temperatur notwendige Korrektion bei.

5. Bestimmung eines räumlich ausgedehnten magnetischen Feldes außerhalb von magnetisierbaren Körpern. Bei einem homogenen Felde können wir uns mit der Messung an einer einzigen Stelle begnügen. Ein inhomogenes Feld muß man mit Probespulen (Wismutspiralen) abtasten. Man hat darauf zu achten, daß man beide senkrecht zu den Kraftlinien orientiert. (Diese Forderung ist erfüllt, wenn bei irgend einer Drehung der Probespule der Ausschlag des ballistischen Galvanometers abnimmt.) Die Probespulen müssen naturgemäß um so dichter liegen, je mehr das Feld von einem homogenen abweicht.

6. Messung des Erdfeldes. Beim Erdfeld haben wir es mit einem über weite Strecken homogenen magnetischen Felde zu tun. Diese Eigenschaft hat man ausgenutzt, um die Horizontalkomponente H_h des Feldes mit besonderen Meßanordnungen möglichst genau zu messen. Zur Apparatur gehören ein permanenter Magnet und ein Magnetometer. Letzteres besteht wieder aus einem an einem sehr dünnen Faden aufgehängten permanenten Magnet, der sich naturgemäß in den magnetische Meridian einzustellen sucht und dessen Ablenkung aus der Ruhelage in bekannter Weise mit Spiegel und Skala beobachtet werden kann.

Die Messung der Horizontalkomponente vollzieht sich in zwei Schritten. Man mißt einmal das Produkt MH_h und das andere Mal den Quotienten $\frac{M}{H_h}$. Mit M ist in diesen Ausdrücken das „magnetische Moment“ des Magnetometermagneten gemeint. Bei einem idealen permanenten Magneten aus punktförmigen Polen (Fig. 8) ist das

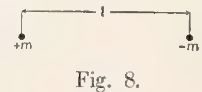


Fig. 8.

magnetische Moment $M = ml$; bei einem gewöhnlichen zylindrischen Magneten mit verteilten magnetischen Mengen erhält man das magnetische Moment, wenn man nach derselben Vorschrift wie oben das magnetische Moment einer jeden Elementarmenge der magnetischen Belegung bildet und dann sämtliche gefundenen Werte addiert ($M = \int dml$)[1]).

6a) Messung des Produktes MH_h. Man läßt den Magnetometermagneten unter dem Einfluß des Erdfeldes um seine Ruhelage schwingen und beobachtet die Schwingungsdauer t. Ist T das Trägheitsmoment des permanenten Magneten in bezug auf den Aufhängefaden, so besteht die Beziehung:

$$MH_h = \frac{\pi^2 T}{t^2} = \sigma \quad \ldots\ldots \quad 14)$$

6b) Messung des Quotienten $\frac{M}{H_h}$. In der Schwingungsebene des Magnetometers und zwar in der Mittelsenkrechten des in der Ruhelage gedachten Magnetometermagneten bringt man einen zweiten permanenten Magneten an (Erste Hauptlage, Fig. 9). Dabei soll der Abstand r der Magnete

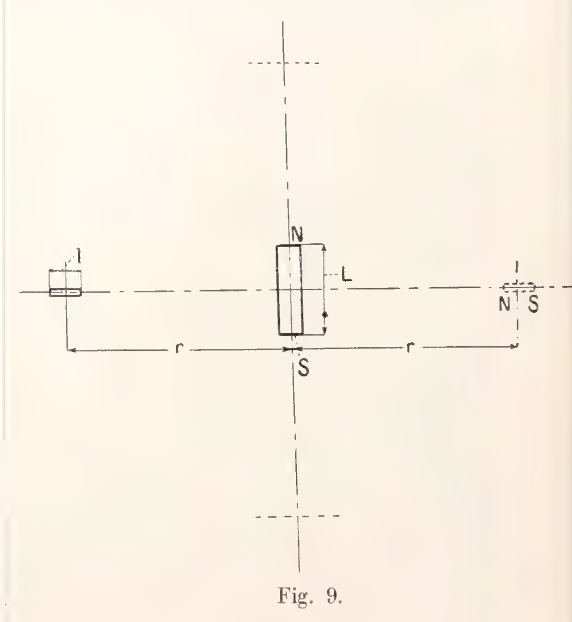


Fig. 9.

groß (mindestens das Dreifache ihrer Stablänge) sein. Das Magnetometer wird aus dem magnetischen Meridian etwas abgelenkt werden und die neue Ruhelage α_1 möge mit Spiegel und Skala beobachtet werden. Man dreht nun den Hilfsmagneten an Ort und Stelle um 180° herum, so daß er dieselbe Lage wie früher einnimmt, Nord- und Südpol aber miteinander vertauscht sind. Man tut dies, um den Einfluß gewisser kleiner Unsymmetrien der Anordnung auf die Messung zu beseitigen. Alsdann erhält das Magnetometer eine

[1]) Dabei sind die Längen l parallel der Zylinderachse zu messen.

Ablenkung nach der anderen Seite und die im Fernrohr abgelesene Einstellung des Magnetometers sei α_2. Dann ist der mittlere Ausschlagswinkel des Magnetometers $\alpha = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{4\,A}$ (A Abstand der Skala vom Spiegel des Magnetometers). Man bringt nun den Hilfsmagneten auf die entgegengesetzte Seite des Magnetometers in die gestrichelte Lage (Fig. 9).

Bei demselben Verfahren wie eben erhalte man die Skalenablesungen β_1, β_2 und den Mittelwert des Ablenkungswinkels $\beta = \frac{\beta_1 - \beta_2}{4\,A}$. Dann ist

$$\varphi = \frac{\alpha + \beta}{2} = \frac{\alpha_1 - \alpha_2 + \beta_1 - \beta_2}{8\,A}$$

der mittlere Ausschlagswinkel sämtlicher Beobachtungen. Nun gibt die Theorie folgende Beziehung:

$$\frac{M}{H_h} = \frac{1}{2} \cdot \frac{r^3 \operatorname{tg} \varphi}{1 + \frac{\eta}{r^2}} = \varrho \; \ldots\ldots\ldots \; 15)$$

wo η, das Korrektionsglied im Nenner, aus den Polabständen L und l nach der Vorschrift: $\eta = \frac{1}{2} L^2 - \frac{3}{4} l^2$ zu berechnen ist. Die Verknüpfung der Beobachtungen a) und b) ergibt: $H_h = \sqrt{\frac{\sigma}{\varrho}}$.

Als Nebenprodukt der Messung folgt: $M = \sqrt{\varrho \cdot \sigma}$. Man kann den Versuch b) auch mit der sogenannten zweiten Hauptlage durchführen. In diesem Falle bringt man die Mitte des Hilfsmagneten in die Verlängerung des Magnetometermagneten und stellt seine Achse senkrecht zu dieser Linie (punktiert gezeichnet, Fig. 9). Die Art der Messung ist die gleiche wie bei der ersten Hauptlage; dagegen steht jetzt der mittlere Ausschlag φ, mit der gesuchten Größe in der Beziehung:

$$\frac{M}{H_h} = \frac{r^3 \operatorname{tg} \varphi}{1 + \frac{\eta'}{r^2}}, \; \ldots\ldots\ldots\ldots \; 16)$$

wo $\eta' = -\frac{3}{8} L^2 + \frac{3}{2} l^2$ ist.

Eine zweite Methode zur Messung der Horizontalintensität H_h des Erdfeldes besteht in folgendem: Man stellt eine flache Spule von n kreisförmigen Windungen in der Entfernung r vom Magneten auf und sorgt dafür, daß ihre Ebene im magnetischen Meridian liegt und daß die in ihrem Mittelpunkte errichtete Senkrechte die Mitte des Magnetometermagneten trifft (Fig. 10). Wird nun der Strom von J Ampere durch die Spule geschickt, so erzeugt er beim Magnetometer ein Feld

$$H_s = \frac{0{,}2\pi J n R^2}{\sqrt{R^2 + r^2}^{\,3}} \text{ (R = Spulenradius),}$$

das senkrecht zum Erdfelde steht, und daher das Magnetometer ablenken wird. Der mit Fernrohr und Skala beim Kommu-

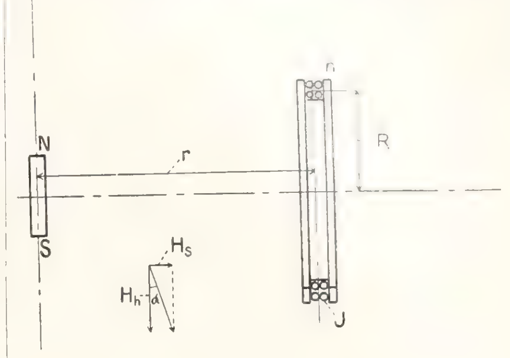


Fig. 10.

tieren des Stromes beobachtete Ausschlag sei: α. Hieraus folgt für den Ablenkungswinkel $\varphi = \frac{\alpha}{4A}$ und weiter für die gesuchte Horizontalintensität

$$H_h = \frac{H_s}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{0{,}2\pi J n R^2}{\sqrt{R^2 + r^2}^{\,3}} \cdot \frac{4A}{\alpha} \; \ldots\ldots \; 17)$$

C. Bestimmung des Zusammenhanges von $\mathfrak{B}$ und $\mathfrak{H}$ bei magnetisierbaren Stoffen.

7. Messungen am Ringe. Die Untersuchung von Eisen auf seine magnetischen Eigenschaften kann so durchgeführt werden, daß man für den Fall massiven Materials zunächst einen Ring dreht. Bei Blechen stanzt man einzelne unter sich gleiche Ringe aus der Blechtafel aus und schichtet sie übereinander. Man wähle die Breite $r_a - r_i$ (Fig. 5) des Ringes klein im Verhältnis zu den Ringradien. Man bringt auf den Ring einige Sekundärwindungen auf, die an ein ballistisches Galvanometer angeschlossen werden und bewickelt ihn gleichmäßig mit einer Magnetisierungswickelung. Zur Bestimmung der Feldstärke H mißt man den Magnetisierungsstrom J und benutzt die Formel 7):

$$H = \frac{0{,}2 n J}{R}$$

Für die Induktion B mißt man den Ausschlag α des ballistischen Galvanometers, der bei einer Aenderung des Magnetisierungsstromes erhalten wird. Dem Ausschlag α entspricht die Aenderung der Induktion (s. Formel 10))

$$\Delta\mathfrak{B} = \frac{C\alpha w . 10^8}{n_s q} \; \ldots\ldots\ldots\ldots \; 18)$$

Für den Eisenquerschnitt q kann man bei massivem Material die Höhe und Breite des Ringes messen. Bei Blechen dagegen mißt man zweckmäßig den inneren und äußeren Radius des Ringes (r_i und r_a), das Gewicht G in Gramm und das spezifische Gewicht s rechnet nach der Formel:

$$q = \frac{G}{s . \pi \, (r_a + r_i)} \quad \ldots \ldots \quad 19)$$

Der Gleichung 18) liegt die Annahme zugrunde, daß sämtliche Kraftlinien, die die sekundären Wickelungen durchsetzen, auch im Eisen verlaufen. Dies trifft streng niemals zu, da zwischen Eisen und Sekundärwindungen sich ein gewisser von Kraftlinien durchsetzter Luftbereich F—q (F mittlere Fläche einer Sekundärwindung) befindet. Durch die Sekundärwindungen geht vielmehr der Fluß qB + (F — q) $\mathfrak{H}$. Es lautet daher die Gleichung 18) in korrigierter Form:

$$\Delta \mathfrak{B} = \frac{C \alpha w}{n_s q} 10^8 - \left(\frac{F}{q} - 1\right) \Delta \mathfrak{H} \quad \ldots \quad 18a)$$

Die Korrektion $\left(\frac{F}{q} - 1\right) \Delta \mathfrak{H} \left(\Delta \mathfrak{H} = \frac{0{,}2\, n \Delta J}{R}\right.$ ist die mit der Stromänderung ΔJ verknüpfte Aenderung von H) gewinnt im allgemeinen erst Bedeutung bei höheren Feldstärken H und stark abweichenden Werten F und q.

Gewöhnlich sind drei Kurven das Ziel der Messung.

7a) Die Nullkurve. Unter der Nullkurve (Fig. 11, Kurve OC) versteht man die Abhängigkeit zwischen B und H, die erhalten wird, wenn man vom unmagnetischen Zustande aus den Magnetisierungsstrom dauernd in einem und demselben Sinne zunehmen läßt. Um den Ring von dem letzten Rest der Remanenz zu befreien, schickt man durch die Magnetisierungswickelung einen Wechselstrom (kommutierter Gleichstrom ist nicht ganz so zweckmäßig) von langsam und stetig abnehmender Stärke. Nun beginnt die eigentliche Messung, bei der der Magnetisierungsstrom J durch Ausschalten von Widerstand gesteigert wird. Bei jedem Sprung beobachtet man die ballistischen Ausschläge des Galvanometers α_1; α_2 usf. Die Größe der Induktion nach dem ersten Sprunge ist:

$B_1 = \frac{C \alpha_1 w}{n_s q} . 10^8$; nach dem zweiten Sprung:

$$B_2 = \frac{C(\alpha_1 + \alpha_2) w}{n_s q} . 10^8 \text{ usf.}$$

Diesen Werten der Induktion ordnet man Werte der Feldstärke H zu, die aus Formel 7) durch Einsetzen der nach jedem Sprung festgestellten Werte des Magnetisierungsstromes J_1; J_2 . . . gefunden werden.

7b) Kommutierungskurve. Die Aufnahme der Nullkurve wird durch die Entmagnetisierung des Eisens, namentlich aber durch die Forderung einer dauernd gleichsinnigen Aenderung des Magnetisierungsstromes erschwert. Wird versehentlich gegen sie verstoßen, so muß man wegen der Hystereseeigenschaften des Eisens die Messung wieder von vorn beginnen. Frei von diesen Nachteilen ist die Kommutierungskurve. Zur

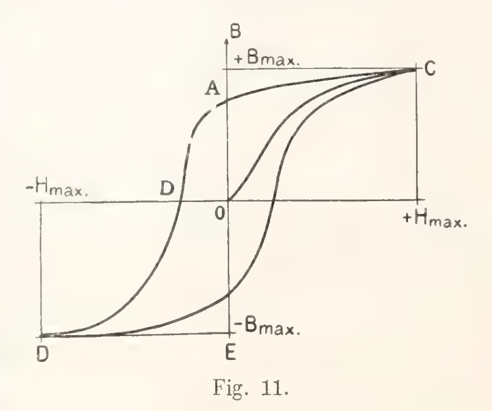


Fig. 11.

Aufnahme eines Punktes dieser Kurve stellt man zunächst einen bestimmten Magnetisierungsstrom ein und kommutiert ihn einige Male bei geöffnetem Galvanometerkreise. Alsdann schließt man den Galvanometerkreis, mißt den Magnetisierungsstrom J und beobachtet den Galvanometerausschlag α beim Kommutieren und ordnet die beiden Werte:

$$B = \frac{1}{2} \frac{C \alpha w}{n_s q} 10^8; \; H = \frac{0{,}2\, nJ}{R}$$

einander zu. Die mehrmalige Kommutierung vor der eigentlichen Messung ist eine Vorsichtsmaßregel, da sich gezeigt hat, daß die ersten aufeinanderfolgenden Ausschläge bei der Kommutierung ein wenig abnehmen, aber einem festen Grenzwert zustreben.

Die Kommutierungskurve stimmt sehr nahe, namentlich bei höheren Feldstärken mit der Nullkurve überein.

7c) Hystereseschleife. Bei Aufnahme der Hystereseschleife läßt man den Magnetisierungsstrom in einer gewissen Anzahl von Sprüngen von dem Werte + J_{max} zu dem Werte — J_{max} fallen und wieder von dem Werte — J_{max} zu dem Werte J_{max} steigen und beobachtet wieder bei jedem Sprunge den Ausschlag α des ballistischen Galvanometers G (Fig. 7). Ist β die Summe der Ausschläge α, die beobachtet werden, während der Strom von seinem maximalen positiven Wert zu seinem maximalen negativen Wert fällt (oder umgekehrt) so ist der maximale Wert der Induktion (wie bei der Kommutierung):

$$B_{max} = \frac{1}{2} \frac{C \beta w}{n_s q} . 10^8$$

Die zu den Einzelausschlägen α gehörigen Werte der Induktion B findet man durch sukzessiven Abzug der nach Formel 18) berechneten Werte $\varDelta B$ von B_{max}. Man erhält auf diese Weise die bekannte Form eines Doppel-S. Die Strecke OA (Fig. 11) nennt man die Remanenz; die Strecke OD die Koerzitivkraft des Materials.

Infolge der Hysterese wird bei der zyklischen Magnetisierung eine gewisse Energie vergeudet. Zwischen dem Werte V_h pro Zyklus und der dem Flächeninhalte f der Hystereseschleife besteht die Beziehung:

$$V_h = \frac{1}{4\pi} . f \; 10^{-7} \text{ Erg}^{1)} \quad . \; . \; . \; . \; . \; 20)$$

8. Messungen am Ellipsoid. Man magnetisiert ein Ellipsoid durch eine Spule (Fig. 12) und stellt es so auf, daß es im magnetischen Meridian liegt und seine Hauptachse in der Verlängerung die Mitte des Magnetometermagneten trifft. Zwischen der Magnetisierung B—H (s. 2e) des Ellipsoides und dem im Fernrohr abgelesenen Ausschlag α in mm und der Horizontalintensität H_h des Erdfeldes an der Stelle des Magnetometers besteht der Zusammenhang:

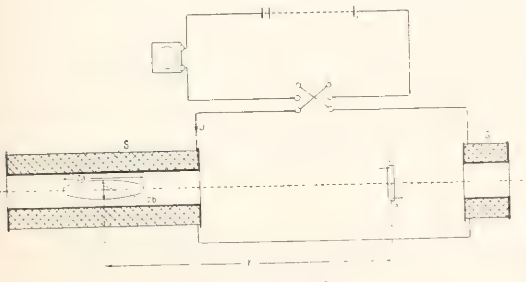


Fig. 12.

$$B - H = \frac{H_h . \pi . r^3 \left(1 - \frac{l^2}{r^2}\right)^2}{V} \frac{\alpha}{A} \; . \; . \; 21)$$

r = Abstand der Mitte des Ellipsoides vom Magnetometermagneten in cm.

l = „Polabstand" des Ellipsoides = 0,775 . der Länge (2a) desselben.

α = Ausschlag in mm.

A = Abstand der Skala vom Magnetometer in mm.

V = Volumen des Ellipsoides in cm³

Diese Formel setzt voraus, daß eine magnetische Einwirkung der Spule S auf das Magnetometer nicht vorhanden ist. Um dies zu erreichen, stellt man (Fig. 12) außer der Magnetisierungsspule S auf der entgegengesetzten Seite des Magnetometers noch eine zweite Spule S′ auf; man schaltet sie derart mit der Spule S elektrisch hintereinander, daß ihre magnetischen Einwirkungen auf das Magnetometer sich aufzuheben suchen. Durch passende Einstellung der Zusatzspule S′ kann man erreichen, daß bei herausgenommenem Ellipsoid eine Aenderung der Einstellung des Magnetometers beim Kommutieren des Stromes J nicht mehr erfolgt. Für die Bestimmung der Horizontalintensität H_h wird in diesem Falle gewöhnlich die Methode 6c) bevorzugt.

Durch Auswerten des Ausdruckes 21) wird zuerst die Größe B—H bekannt. Danach ist man imstande nach Formel 4) und 5) die magnetische Feldstärke H im Ellipsoid und schließlich auch die Induktion B zu finden.

9. Die Jochmethode. Am Ring und am Ellipsoid lassen sich absolute Messungen ausführen. Bei ersteren empfindet man jedoch die stets von neuem aufzubringende Bewickelung, beim letzteren die Herstellung des Ellipsoides und die Art der Messung und Rechnung als lästig. Werden an die Genauigkeit keine hohen Ansprüche gestellt, so greift man zweckmäßig zu einer Jochmethode.

Die Meßanordnung (Fig. 13) besteht aus einer Magnetisierungsspule, in die die sekundäre Spule s′ für das ballistische Galvanometer bereits hineingesteckt ist. Außen ist die Magnetisierungsspule von einem Joche von sehr großem Querschnitt umgeben. Man schiebt nun durch Oeffnungen im Joche den zu untersuchenden Eisenstab in die Magnetisierungsspule hinein und sorgt durch Anziehen von Klemmbacken für einen guten magnetischen Schluß zwischen Joch und Prüfstab. Man erhält so einen magnetischen Kreis, dessen Hauptwiderstand in dem zu untersuchenden Stabe liegt (s. 3). Das Feld im Prüfstabe ist beinahe homogen und man kann daher schreiben:

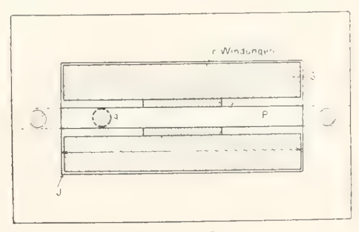


Fig. 13.

$$H = \frac{0{,}4\pi n J}{l} \; . \; . \; . \; . \; . \; . \; 22)$$

(l = Länge des Stabes zwischen den Jochen.)

Die Induktion mißt man ballistisch wie beim Ringe. Offenbar ist wegen der Ver-

[1]) Vorausgesetzt daß für B = 1 und H = 1 beim Auftragen die Längeneinheit gewählt wird.

nachlässigung des magnetischen Widerstandes des Joches und der Einklemmungsstelle des Stabes der nach der Formel 22) gefundene Wert etwas zu hoch. Man kann daher die Genauigkeit der Methode noch durch Anbringung einer Korrektur (Scherung) etwas verbessern. Man findet die Scherung dadurch, daß man einen im Joche gemessenen Stab zum Ellipsoid abdreht, ihn nach der Methode 8) untersucht und die Ergebnisse vergleicht. Leider ist die Korrektur vom Material abhängig. Der Charakter der Scherungskurve geht für die Null- und Kommutierungskurve aus Figur 14 hervor.

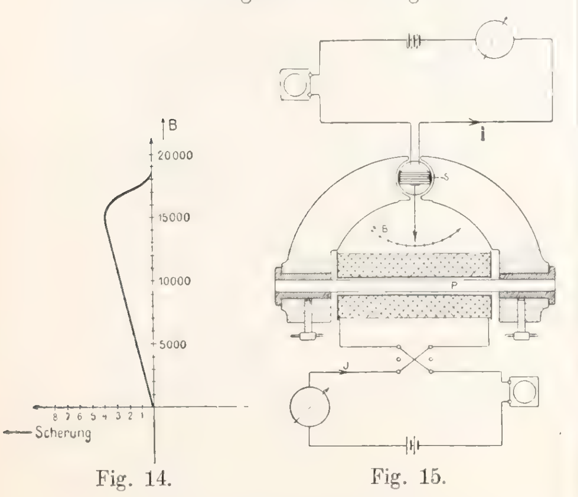


Fig. 14. Fig. 15.

10. Der Köpselsche Apparat. Der Köpselsche Apparat (Fig. 15) besitzt ebenfalls ein Joch. Sein Hauptvorzug liegt darin, daß er die Induktion nicht ballistisch durch eine zeitlich rasch veränderliche Ablenkung, sondern durch den dauernden Ausschlag eines Zeigers mißt. Aus dem Grunde trägt das Joch eine Bohrung, die bis auf einen kleinen Luftspalt mit einem weichen Eisenkern ausgefüllt ist (Fig. 15). In dem Luftspalt befindet sich wie bei Drehspulen-Instrumenten eine kleine Spule s mit einem Zeiger. Durch die Spule s wird ein schwacher Hilfsstrom i hindurchgeschickt. Wird nun der Prüfstab P magnetisiert, so entsteht in dem Luftspalt ein magnetisches Feld und die Spule und der Zeiger drehen sich solange, bis die Spannung einer in der Figur nicht gezeichneten Feder das Gleichgewicht wiederhergestellt hat. Sind B und B′ die Induktionen in der Mitte des Prüfstabes P und in dem Luftspalte, q und q′ die Querschnitte des Stabes und des Luftspaltes (letzterer gemessen längs der Bohrung), so ist (von Streuung abgesehen)

$$B' = \frac{Bq}{q'}$$

Für das Drehmoment und den Ausschlagswinkel α des Zeigers gilt beim Hilfsstrome i

$$\alpha = \frac{K}{q'} . Bq . i = k . B . qi \quad . \ . \ . \quad 23)$$

K und k = Konstante.

Der Winkel α ist nur dann allein der Induktion B proportional, und es können nur dann aufder Skala sofort Induktionswerte abgelesen werden, wenn qi = const. ist. D. h. man muß den Hilfsstrom i nach der Größe des Querschnittes q des Prüfstabes P einregulieren. Und zwar muß man ihn bei großem Querschnitt klein, bei kleinem Querschnitt groß wählen. Die genauere Beziehung zwischen Querschnitt und zwischen Strom wird jedem Apparat beigegeben. Die Feldstärke H wird wie beim Joche nach 22) berechnet. Auch dieser Apparat bedarf einer Scherung, die größer und unregelmäßiger ist als beim Joche. Die Firma Siemens & Halske liefert jedem Apparat Scherungskurven für einige Materialsorten bei.

11. Die Wage von Du Bois. Du Bois trennt durch zwei sehr schmale Schlitze A und B (Fig. 16) einen Teil des Joches ab und

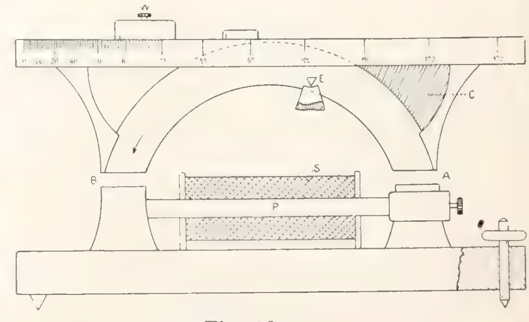


Fig. 16.

bildet ihn als Wage mit ungleichen Wagebalken aus. Für den unmagnetischen Zustand wird die Wage durch ein Bleigewicht C ausbalanciert. Erhält der Prüfstab P eine Induktion, so entsteht in den Schlitzen A und B ein gewisses magnetisches Feld. Die Schlitzflächen ziehen sich alsdann mit einer Kraft an, die dem Quadrate der dort herrschenden Induktion proportional ist. Das dadurch gestörte Gleichgewicht der Wage wird durch ein Laufgewicht W wiederhergestellt. Ein regelrechtes Einspielen der Wage erhält man zwar nicht. Man verschiebt das Laufgewicht so lange, bis die Wage bei der leisesten Erschütterung umkippt. Die Induktion im Prüfstab und die Induktion in den Schlitzen sind angenähert einander proportional. Aus diesem Grunde ist das ausgewogene Drehmoment der Wage dem Quadrate der Induktion des Prüfstabes P ebenfalls nahezu proportional. Die Feldstärke H wird wie beim Joche berechnet.

Auch die Wage bedarf für absolute Messungen einer Scherung.

12. Messung sehr hoher Induktionen. Die für diesen Zweck von Ewing herrührende Anordnung zeigt Figur 17. Die Induktionslinien durchsetzen die dicken Schenkel eines kräftigen Elektromagnetes E und werden in dem schmalen Steg AB (Isthmus) zusammengepreßt, der infolgedessen außerordentlich hoch magnetisiert wird (bis zu B=40000). Ewing stellte das ganze Stück CBAD (Fig. 17) aus dem zu untersuchenden Material her. Gumlich hat später die Anordnung dadurch verbessert,

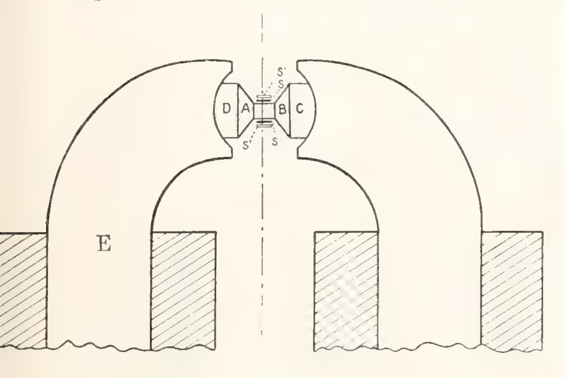


Fig. 17.

daß er allein den Isthmus auswechselbar gestaltete. Die Induktion bestimmte Ewing ballistisch durch eine auf den Isthmus aufgebrachte Sekundärwickelung s. Die notwendige Flußänderung wurde durch Drehen des Probekörpers CBAD um 180° hervorgebracht. Zur Messung der Feldstärke war eine weitere sekundäre Wickelung s' von genau gleicher Windungszahl wie bei der Wickelung s angebracht. Beide Sekundärspulen wurden bei der Messung der Feldstärke H gegeneinander geschaltet. Bei einer halben Drehung des Probekörpers maß Ewing zunächst ballistisch die Induktion oder den ihr zahlenmäßig gleichen Wert der Feldstärke H in dem zwischen den Spulen s und s' gelegenen Luftbereich. Nun hat das magnetische Feld H die Eigenschaft, daß beim Uebergang von einem magnetisierbaren Körper zum anderen seine Tangentialkomponente (und gerade diese bringt im Eisen die Induktion hervor) stetig übergeht (s. hierzu auch den Abschnitt „Magnetische Influenz"). Ewing konnte somit den gemessenen Wert der Feldstärke in Luft gleich dem gesuchten Wert der Feldstärke H im Eisen setzen.

13. Messung der Permeabilität an Epstein-Bündeln. Die in 12 erwähnte Eigenschaft des magnetischen Feldes, daß seine Tangential-Komponente an der Grenze zwischen Eisen und Luft stetig übergeht, ist vom Gumlich und Rogowski zur Messung der Permeabilität an Epstein-Bündeln ausgenutzt worden. Gumlich und Rogowski bringen in der Mitte der Epstein-Bündel (s. hierzu 16c und Fig. 18) also an nahezu streuungsfreier Stelle nicht nur die übliche Sekundärwickelung s zur ballistischen Messung der Induktion B, sondern auch je vier flache hintereinander geschaltete Spulen, s_1' bis s_4', die ganz in der Nähe der Eisenoberfläche dieser parallel liegen sollen.

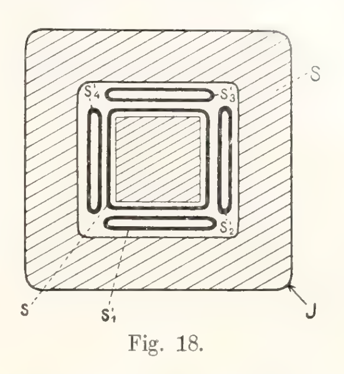


Fig. 18.

Durch diese Spulen kann zunächst das Feld in der Luft bestimmt werden. Lägen die Spulen unmittelbar auf dem Eisen und wären sie unendlich schmal, so würde nach dem Vorigen die in Luft gemessene und die im Eisen gesuchte Feldstärke H miteinander übereinstimmen. Da aber die Voraussetzungen nur angenähert zutreffen, so muß man die gemessene Feldstärke mit einer Korrektion versehen, die aber für höhere Magnetisierungen ($H > 5$) klein ist. Man muß die Spulen s_1 bis s_4' an nahezu streuungsfreier Stelle anbringen, damit bei nicht ganz erreichter Parallelstellung derselben zur Eisenoberfläche der hereinkommende Bruchteil der Normal-Komponente ($H_n . \sin\varphi$) das Resultat nicht trübt.

D. Magnetische Messungen im Wechselfelde.

Bringen wir Eisen in das magnetische Wechselfeld einer von Wechselströmen durchflossenen Spule, so werden in ihm Wirbelströme induziert. Diese fallen natürlich um so mehr ins Gewicht, je massiver das Eisen ist und je besser es elektrisch leitet. Im Wechselfelde hängt daher der magnetische Zustand des Eisens nicht wie bei Gleichstrom allein von der magnetischen Wirkung der Spulenströme, sondern auch von der magnetischen Wirkung der Wirbelströme ab. Man kann nun aber die Wirbelströme wenigstens bei niedriger Frequenz bis auf ein bescheidenes Maß durch die Unterteilung

des Eisenquerschnittes senkrecht zu den Kraftlinien und Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit (Siliciumlegierungen des Eisens) unterdrücken. Aus diesem Grunde wird in der Wechselstromtechnik das Eisen allgemein in Form von Blechen verwendet. Im folgenden ist immer eine so weitgehende Unterteilung angenommen, daß man von der magnetisierenden Wirkung der Wirbelströme absehen kann.

14. **Messung der Induktion.** Man bringt an die ins Auge gefaßte Stelle A eine sekundäre Wickelung und verbindet sie mit einem Wechselstrom-Voltmeter, dessen Ausschlag E Volt anzeigen möge. Die momentan induzierte EMK hat den Wert:

$$e = -\frac{d}{dt}\left(B_{max}\, n_s F . \sin \omega t\right) 10^{-8}$$

$$= B_{max} n_s F . \omega . 10^{-8} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

($\omega = 2\pi\nu$ = Kreisfrequenz, ν = Frequenz). Somit ergibt sich für den abgelesenen Effektivwert

$$E = 4{,}44\ \nu\ B_{max} . n_s F . 10^{-8}$$

und für den Maximalwert der Induktion:

$$B_{max} = \frac{E . 10^8}{4{,}44\,\nu n_s F} \quad . \ . \ . \ . \ . \quad 24)$$

Bei dieser Formel sind stillschweigend zwei Voraussetzungen gemacht: 1. Daß die magnetisierende Rückwirkung des Voltmeterstromes das zu untersuchende Feld nicht merklich verändert. Diese Bedingung erfordert unter Umständen die Benutzung eines genügend empfindlichen Voltmeters oder eines Elektrometers. 2. Daß der induzierten EMK e eine reine Sinusform zukommt. Trifft letzteres nicht zu, so tritt an Stelle von 24) die Formel:

$$B_{max} = \frac{E . 10^8}{f . 4\nu n_s F} \quad . \ . \ . \ . \quad 25)$$

Der Korrektionsfaktor f heißt Formfaktor. Er ist das Verhältnis des quadratischen Mittelwertes (Effektivwert) der Spannungskurve zum arithmetischen (elektrolytischen) Mittelwert.

$$f = \frac{\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T e^2 dt}}{\frac{1}{\frac{T}{2}}\int_0^{\frac{T}{2}} e\,dt}$$

Die rein sinusförmige Kurve hat den Effektivwert f = 1.11.

Wie bestimmt man den Formfaktor? Hierfür gibt es zwei Wege.

1. Man nimmt die Spannungskurve oszyllographisch auf und planimetriert unter Zugrundelegung eines beliebigen Maßstabes die von einer Halbperiode (stark ausgezogen Fig. 19) begrenzte Fläche. Das Ergebnis sei a cm².

Man quadriere nun die einzelnen Ordinaten der Wechselstromkurve unter Beibehaltung desselben Maßstabes, zeichne die

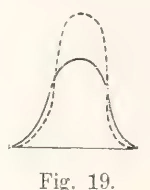


Fig. 19.

(gestrichelt angedeutete) quadratische Kurve und planimetriere wieder. Jetzt mögen b cm² gefunden werden. Dann ist der Formfaktor

$$f = \frac{\sqrt{b}}{a}$$

2. Offenbar besteht die Schwierigkeit der Bestimmung des Formfaktors in der Messung des (elektrolytischen) Mittelwertes einer Halbperiode. Wir wollen annehmen, wir hätten eine Meßvorrichtung, die uns gestattet, die negativen Halbperioden zu unterdrücken. Dann würden wir in einem Spannungsmesser für Gleichstrom (D'Arsonvalinstrument) die Hälfte des gesuchten elektrolytischen Mittelwertes messen können. Eine solche Vorrichtung besteht nun in einer rotierenden

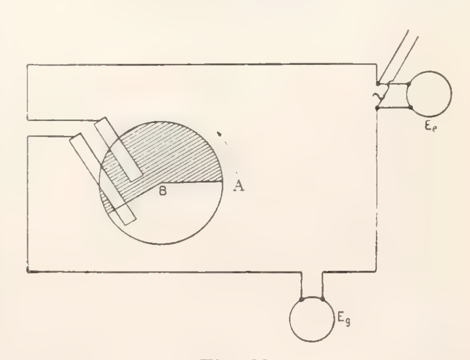


Fig. 20.

Scheibe, die zum Teil einen leitenden (Fig. 20 schraffiert angedeutet) zum Teil einen isolierenden Belag trägt und auf der 2 Bürsten schleifen.

Die Schaltung geht aus Figur 20 hervor.

Die Vorrichtung muß, soll sie den gesuchten Mittelwert geben, 3 Bedingungen erfüllen.

a) Die Scheibe muß pro Periode des Wechselstromes eine Umdrehung machen.

b) Die eine Bürste muß gerade auf der Verlängerung der Linie AB liegen, wenn die andere Bürste auf dem leitenden Belag aufläuft, damit genau eine halbe Periode aus der Wechselspannung ausgeschnitten wird.

c) Der Moment, von dem an beide Bürsten auf dem Metall schleifen, muß mit dem Anfang einer Halbperiode übereinstimmen.

Die Forderung a) erreicht man durch Antrieb der Scheibe mit einem Wechselstromsynchronmotor, der von der zu untersuchenden Spannung angetrieben wird.

Die Forderung b) wird erfüllt durch Probieren, indem man die Bürsten gegeneinander verschiebt.

Für die Forderung c) endlich muß man beide Bürsten gemeinsam auf einem Kreise um den Mittelpunkt der Scheibe drehen. Man erkennt die für b) und c) richtige Einstellung daran, daß der Spannungsmesser für Gleichstrom das Maximum des erhaltbaren Ausschlages anzeigt.

Erhält man auf diese Weise E_g Volt, so ist (wegen Fortfall der negativen Hälften der Spannungskurve) der gesuchte elektrolytische Mittelwert $2E_g$. Ergibt eine Messung mit dem Wechselstromvoltmeter, das man natürlich ohne die eben beschriebene Vorrichtung mit der Spannungsquelle in Verbindung setzt, E_r Volt so ist

$$f = \frac{E_r}{2E_g}.$$

15. Messung der Permeabilität. Drückt man der Magnetisierungswickelung eines Ringes aus Blechringen (Fig. 5) eine sinusförmige Spannung auf, so kann man nach 14 den Maximalwert der Induktion im Eisen bestimmen. Stellt man nun gleichzeitig das Maximum der Momentanwerte des Stromes fest (durch den Oszillographen oder durch punktweise Aufnahme der Stromkurve) so kann man aus J_{max} nach der Formel 7) das Maximum der magnetischen Feldstärke H_{max} berechnen. Auf diese Weise wird die Spitze des vom Eisen beschriebenen Hysteresezyklus festgelegt. Der Quotient $\frac{B_{max}}{H_{max}}$ kann die Permeabilität für Wechselstrom genannt werden. Es hat sich gezeigt, daß die Permeabilität bei den technisch üblichen Periodenzahlen praktisch nicht von dem Werte der Permeabilität des Eisens bei Gleichstrom abweicht. Bei höheren Periodenzahlen trifft dies indessen nicht mehr zu.

16. Verlustmessungen. Hysterese und Wirbelströme verursachen Verluste, deren Messung eine große technische Bedeutung zukommt. Für den Hystereseverlust V_h pro kg kann man nach Steinmetz angenähert schreiben:

$$V_h = \eta . B_{max}^{1,6} . \nu \text{ Watt} \quad \ldots\ldots 24)$$

Für den Wirbelstromverlust pro kg gilt angenähert:

$$V_w = c B_{max}^2 . \nu^2 \text{ Watt} \quad \ldots\ldots 25)$$

η und c Konstanten.

Es beträgt z. B. für eine maximale Induktion von 10000 und 50 Perioden

bei normalem Blech etwa $V_h = 2,6$ $V_w = 0,6$
bei (mit Silicium) legiertem Blech etwa:
$V_h = 1,7$ $V_w = 0,25$ Watt pro kg.

Die Messung des Eisenverlustes kann in folgender Weise geschehen:

Man stanzt aus dem zu untersuchenden Blech scheibenförmige Ringe aus und schichtet sie übereinander. Man legt dabei zwischen

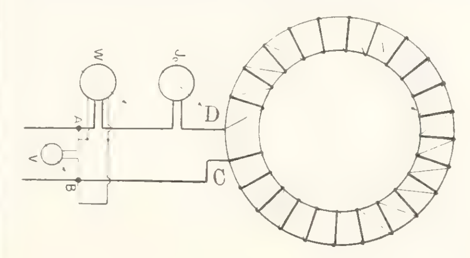


Fig. 21.

je zwei aufeinanderfolgende Scheiben ein dünnes Blättchen aus Seidenpapier, um den Wirbelströmen den Austritt aus einer Scheibe zur benachbarten zu verwehren. Schließlich wird der ganze Ring mit einer Magnetisierungswickelung versehen und in die Schaltung Figur 21 gebracht. Man mißt den Magnetisierungsstrom I_o, die Spannung E, die vom Wattmeter angezeigte Leistung W und den Widerstand r des Zweiges ADCB. Das Wattmeter mißt die gesamte in den Zweig BCDA hereingeschickte Leistung also die gesuchten Eisenverluste We und den Joulschen Verlust $J_o^2 r$. Der Eisenverlust beträgt daher:

$$W_e = W - J_o^2 r \quad \ldots\ldots 28)$$

Bei der Frequenz ν beträgt die vom Feld im Eisen induzierte Spannung

$$E_e = f . 4 B_{max} \nu n_s F 10^{-8} \text{ Volt.}$$

An den Klemmen des Voltmeters muß beim Versuch eine klein wenig höhere Spannung eingestellt werden, die aus den der Spannung E_e und dem Ohmschen Spannungsabfalle $J_o r$ durch geometrische Addition (Fig. 22) folgt. In erster Annäherung kann man schreiben:

$$E = E_e + I_o r \cos\varphi \quad \ldots\ldots 26)$$

wo der Leistungsfaktor

$$\cos\varphi = \frac{W}{E_e I_o} \quad \ldots\ldots 27)$$

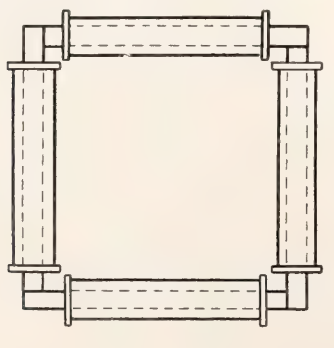
a) Aus Gründen der Bequemlichkeit und der Schnelligkeit der Messung hat Möllinger der Magnetisierungswickelung des Ringes eine besondere Anordnung gegeben. Möllinger schneidet jede einzelne Windung auf, versieht das eine Ende der Schnittstelle mit einem federnden, konischen Kontakt. Das andere Ende bildet er hohlkegelförmig aus und vereinigt eine gewisse Anzahl von Windungen zu einer Gruppe. Auf diese Weise kann man mit wenigen Handgriffen die Wickelung zur Aufnahme der Blechringe auseinander klappen und wiederum zusammensetzen.



Fig. 22.

b) Richter hat den ziemlich erheblichen Materialverbrauch bei der Ringmethode durch Konstruktion eines Apparates beseitigen wollen, bei dem man die vollen Blechtafeln ringförmig zusammen biegt. Er muß hierbei eine Stoßfuge in Kauf nehmen. Trotzdem gibt sein Apparat brauchbare Werte. Er ist aber in der Handhabung unbequem.

c) Einen auf den ersten Blick nicht ganz einwandfreien, nach genaueren Untersuchungen aber recht brauchbaren Apparat hat Epstein angegeben. Epstein schneidet aus den Blechtafeln zur einen Hälfte in zur anderen Hälfte senkrecht zur Walzrichtung Streifen von 3 cm Breite und 50 cm Länge aus. Diese Streifen werden unter Zwischenlage von dünnem Seidenpapier zu Bündeln von etwa 3 × 3 qcm Querschnitt zusammen gepackt und in 4 zu einem Quadrat angeordnete Magnetisierungsspulen geschoben und durch Klemmpacken fest zusammen gepreßt (Fig. 23). Die Messung


Fig. 23.

vollzieht sich wie oben angegeben. Schließlich sei erwähnt, daß man die Messung und Rechnung dadurch vereinfachen kann, daß man auf dem Eisen außer der Magnetisierungswicklung S noch eine Sekundärwicklung S′ von genau gleicher Windungszahl anbringt (Fig. 24). An die Sekundärspule S′ schließt man die Spannungsspule des Wattmeters und des Voltmeters an. Offenbar kann man jetzt am Voltmeter unmittelbar die Eisenspannung E_e einstellen. Man mißt in dieser Schaltung durch den Ausschlag W des Wattmeters die gesuchten Eisenverluste W_e und die in der Spannungsspule des Wattmeters

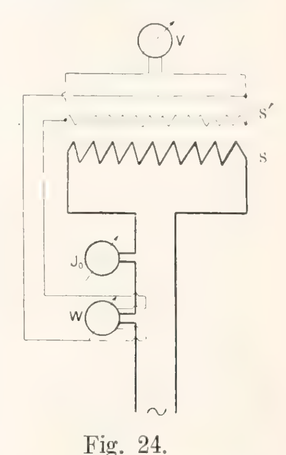
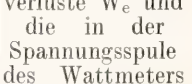


Fig. 24.



(Widerstand r_w) und des Voltmeters (Widerstand r_r) verlorene Joulesche Energie $\frac{E_e^2}{r_w} + \frac{E_e^2}{r_r}$. Die gesuchten Eisenverluste betragen daher:

$$W_e = W - E^2 \frac{r_w + r_r}{r_w \cdot r_r} \quad \text{. . . . . 29)}$$

Hierbei ist voraus gesetzt, daß der Widerstand $r_{s'}$ der Sekundärspule sehr klein ist. Trifft dies nicht zu, so erhält die rechte Seite der Formel noch den Korrektionsfaktor

$$\left(1 + \frac{r_{s'}}{r_w + r_r}\right) \quad \text{. . . . . 30)}$$

Literatur. ***Kohlrausch,*** *Leitfaden der praktischen Physik, Leipzig 1910.* — ***G. Mie,*** *Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus, Stuttgart 1910.* — ***R. Gans,*** *Einführung in die Theorie des Magnetismus, Leipzig 1908.* — ***E. Schmidt,*** *Magnetische Untersuchung des Eisens, Halle 1900.* — ***H. Du Bois,*** *Magnetische Kreise, Berlin 1894.* — ***Ewing,*** *Magnetische Induktion im Eisen und verwandten Metallen, Berlin 1892.* — ***J. C. Maxwell,*** *Lehrbuch der Elektrizität und des Magnetismus, Berlin 1883.* — ***E. Mascart und E. Joubert,*** *Lecons sur l'electricité ėt magnétisme, Paris 1882.*

W. Rogowski.

Magnetismus der Mineralien und Gesteine.

Es sind zweierlei Erscheinungen in Betracht zu ziehen: 1. Die Eigenschaft der Mineralien und Gesteine vom Magneten angezogen oder abgestoßen zu werden. 2. Die Eigenschaft selbst polaren Magnetismus zu besitzen oder andere Körper anzuziehen. Beides kommt vor.

1. Bei den einfachen magnetischen Körpern unterscheidet man nach Faraday

paramagnetische und diamagnetische. Die ersteren werden angezogen, die letzteren abgestoßen. Bei jenen stellt sich ein Stäbchen zwischen zwei Magnetpolen axial, bei diesen äquatorial (weiteres insbesondere über den Magnetismus der Kristalle siehe bei „Magnetismus"). Uns interessieren hier nur die paramagnetischen, d. h. diejenigen, welche von einem Magneten angezogen werden, beziehungsweise anziehend auf ihn wirken. Diese Eigenschaft, welche in der Natur allen eisenhaltigen Mineralien und Gesteinen und zwar mit steigendem Eisengehalt in erhöhtem Maße zukommt, ist von großer Bedeutung bei allen geologischen Bestimmungen, welche mit der Magnetnadel vorgenommen werden, sie ist auch von Bedeutung bei der Trennung der einzelnen Gemengteile eines Gesteins mit Hilfe von stärkeren oder schwächeren Magneten.

2. Noch wichtiger bei geologischen Untersuchungen ist wegen der dadurch verursachten Störungen der Deklination und Inklination der polare Magnetismus der Mineralien und Gesteine. Die bekanntesten Mineralien, die wie ein Magnet wirken können, sind das Magneteisen (Fe_3O_4) und der Magnetkies (FeS), der Chromit ($FeCr_2O_4$), auch manche eisenhaltige Platinvorkommnisse. Beim Magneteisen war die Eigenschaft schon den alten Griechen bekannt. Es ist aber keines wegs aller Magnetit polarmagnetisch und ebensowenig aller Magnetkies, sondern es sind zumeist nur etwas zersetzte Stücke und Kristalle damit begabt. Bei manchen Mineralien, z. B. Biotit, kann man polaren Magnetismus durch Glühen künstlich hervorrufen. Solchen polaren Magnetismus hat man aber auch abgesehen von den Magneteisenbergen Kleinasiens, des Urals, Skandinaviens usw. an zahlreichen anderen Gesteinen beobachtet. Die ältesten Mitteilungen stammen wohl von Bougner, der ihn bei der Gradmessung am Aequator im Jahre 1742 an Felsblöcken zwischen Quito und Sta. Marta beobachtete. An den Granitklippen des Harzes hat ihn v. Trebra 1785 und an dem Serpentin des Heidberges im Fichtelgebirge kurze Zeit nachher A. v. Humboldt bemerkt. Seitdem hat man zahllose einzelne Vorkommnisse kennen gelernt und insbesondere in Italien sind eingehende Untersuchungen besonders an Lavaströmen gemacht worden. Aus den vielen Beobachtungen läßt sich folgendes Allgemeine herausschälen: Der polare Gesteinsmagnetismus wird immer nur auf Gipfeln oder an exponierten Stellen am häufigsten und stärksten auf der Wetterseite, beobachtet, er ist immer eine oberflächliche Erscheinung, die sich nie in die Tiefe fortsetzt, die Verteilung der Pole an einem Felsen ist meist ganz unregelmäßig, bei Lavaströmen und Magneteisenlagern soll auch eine dem Erdmagnetismus reziproke, regelmäßige Anordnung vorkommen, er ist häufiger bei Eruptiv- und metamorphischen Gesteinen als bei Sedimenten, um so stärker und um so häufiger je eisenreicher das betroffene Gestein ist.

Da der polare Magnetismus der Gesteine keine ursprüngliche Eigenschaft darstellt, so hat man nach seiner Ursache gesucht. Gonnard vermutete sie in der Verwitterung, Zaddach im häufigen Temperaturwechsel unter atmosphärischem Einfluß, Melloni in der plötzlichen Erstarrung der Laven, Naumann an einem japanischen Lavablock in der Einwirkung des Blitzschlags. Von diesen Hypothesen sind zwei experimentell geprüft worden. Melloni u. a. haben durch Glühen und Schmelzen von Lavastücken, die vorher und nachher (mit dem Magnetoskop) genau untersucht wurden, festgestellt, daß man dadurch in der Tat polaren Magnetismus erzeugen kann und daß die Stellung der Pole sich wie bei einem weichen Eisenstab gesetzmäßig zum Erdmagnetismus orientiert. Ueber die Einwirkung des elektrischen Funkens hat Pockels Untersuchungen gemacht und nachgewiesen, daß man durch starke Entladungen in der Tat die meisten Gesteine polarmagnetisch machen kann und zwar um so stärker je heftiger die Entladung, je eisenreicher das Gestein ist. Sowohl die eine als die andere Art der Entstehung hat in der Natur ihre Bestätigung erfahren. Die Versuche von Melloni z. B. durch Folgheraiter und Bruhnes, die von Pockels durch Platania und durch A. Sella, der den Magnetismus besonders häufig an den durch Blitzschlag verglasten Felsen des Monte Rosa gefunden hat.

Literatur. ***S. Günther***, *Handbuch der Geophysik II, 1897, Seite 571.* — ***F. Zirkel***, *Lehrbuch der Petrographie I, 1893, Seite 560.* — ***E. Kayser***, *Lehrbuch der Geologie I, 1909, Seite 89.* — ***Melloni***, *Sulla polarità della lave e rocce affini und Sopra la calamitazione delle lave in virtù del calore e gli effetti dovuti alla forza coercitiva di qualunque roccia magnetica. Verh. d. Ak. d. Wissensch. zu Neapel 1856.* — ***F. Pockels***, *Ueber Gesteinsmagnetismus und seine wahrscheinliche Ursache. Neu. Jahrb. f. Mineral. usw. 1897, I, Seite 66.* — ***G. Folgheraiter***, *L'induzione terrestre ed il magnetismo delle roccie vulcaniche. Atti d. R. Accad. dei Lincei Cl. di fisiche etc. (5), IV, 1895, Seite 203.* — ***B. Bruhnes et P. David***, *Sur la direction de l'aimantation permanente dans diverses roches volcaniques. C. R. de l'acad. d. sci. 137, 1903, Seite 975.* — ***Gaetano Platania et Giovanni Platania***, *Effets magnétiques de la foudre sur les roches volcaniques. C. R. de l'acad. d. sci. 141, 1905, Seite 974.*

G. Linck.

Magnetooptik.

1. Vorbemerkungen: a) Magnetfelder; b) Lichtemission und Lichtfortpflanzung. 2. Magnetooptische Emissionseffekte: a) Zerlegung von Schwingungen; b) Wirkung eines Magnetfeldes auf ein Elektron; c) Der normale Zeeman-Effekt; d) Folgerungen; e) Anormale Intensitäten; f) Kompliziertere Zerlegungen. 3. Magnetooptische Absorptionseffekte: a) Elektronentheorie der Absorption und Dispersion; b) Gewöhnliche und zirkulare Doppelbrechung; c) Magnetische Zerlegung von Absorptionslinien; d) Rückschlüsse von den Effekten der Absorption auf die der Emission; e) Die Dissymmetrie der Triplets; f) Zirkulare magnetische Doppelbrechung; g) Die magnetische Drehung der Polarisationsebene; h) Magnetische lineare Doppelbrechung; i) Doppelbrechung durch sekundäre Umstände; k) Magnetooptische Effekte in gegen das Magnetfeld geneigten Richtungen; l) Magnetische Drehung der Polarisationsebene in Kristallen; m) Zeeman-Effekte bei Kristallen; n) Magnetooptische Wirkungen bei normaler Reflexion; o) Effekte bei schiefer Reflexion.

1. Vorbemerkungen. 1a) Magnetfelder. Unter dem Namen Magnetooptik wird die Gesamtheit der optischen Erscheinungen (oder der Veränderungen optischer Erscheinungen) verstanden, welche bei Einwirkung eines magnetischen Feldes auf Licht aussendende oder fortpflanzende Körper eintreten. Um dieselben zu beobachten, hat man also die bezeichneten Körper — im ersten Falle eine geeignete Lichtquelle, im letzteren eine mehr oder weniger durchsichtige Substanz — entweder zwischen die Pole eines Magneten — am besten eines Elektromagneten — oder in den Hohlraum einer von einem elektrischen Strom durchflossenen Rolle zu bringen.

In dem einen, wie in dem anderen Falle wird der Körper dann, wie man sich anschaulich ausdrückt, von magnetischer Kraft durchströmt oder von magnetischen Kraftlinien durchsetzt. Die Richtung der (positiven) Kraft oder Kraftströmung verläuft zwischen den Polen eines Hufeisenmagneten (welche Form bekanntlich auch bei Elektromagneten bevorzugt wird) nahezu geradlinig vom positiven oder Nordpol zum negativen oder Südpol; bei einer stromdurchflossenen Rolle geht sie axial und tritt auf derjenigen Seite in die Rolle hinein, von welcher gesehen die positive elektrische Strömung die Achse im Sinne des Uhrzeigers umkreist.

Die Richtungen, in denen hauptsächlich magnetooptische Effekte beobachtet werden, sind diejenigen parallel oder normal zur Kraftströmung des Feldes. Für erstere Beobachtungen müssen die Polschuhe des Elektromagneten durchbohrt sein, während Drahtrollen diese Richtung von vornherein freigeben.

Die Stärke eines magnetischen Feldes wird in „Gauß" gemessen. Um von der durch „ein Gauß" bezeichneten Feldstärke eine Vorstellung zu geben, sei bemerkt, daß ein Strom von 10 Ampère, der einen Kreisring von 1 cm Radius durchfließt, in dessen Mittelpunkt ein Feld von $2\pi = 6{,}28$ Gauß bewirkt. In Drahtrollen kann man das Feld nur selten über 2000 Gauß steigern; zwischen Spitzpolen der mächtigsten Elektromagneten — also in sehr kleinen Bereichen — kann man 40 000 bis 50 000 Gauß erzielen.

1b) Lichtemission und Lichtfortpflanzung. Eine erläuternde Schilderung der magnetooptischen Effekte muß an die modernen Vorstellungen über das Wesen der Lichterregung und -fortpflanzung anknüpfen. Nach diesen Vorstellungen befinden sich in den Molekülen der ponderabeln Körper elektrische Elementarteile von äußerster Kleinheit, Elektronen, die nach Gleichgewichtslagen innerhalb derselben hinstreben. Die Kraft, welche die Elektronen nach den Gleichgewichtslagen hinzieht, ist zur Erklärung der Beobachtungen als der Entfernung (r) von derselben proportional anzunehmen, also in der Form Kr anzusetzen; man nennt diese Kraft, da sie gewisse Analogien zu elastischen Wirkungen hat, quasielastisch. Ihr Gesetz läßt sich aus der Erfahrungstatsache schließen, daß dasselbe Elektron (außerhalb des Magnetfeldes) bei ganz beliebiger Erregung immer dieselbe Umlaufsdauer T, resp. dieselbe Frequenz $\nu = 2\pi/T$ besitzt, nämlich immer dieselbe Farbe aussendet; denn nur die Form Kr ist hiermit verträglich. Der Wert der Schwingungsfrequenz ν folgt dabei aus der Beziehung $\nu^2 = K/m$, wenn m die träge Masse des Elektron bezeichnet (vgl. den Artikel „Schwingende Bewegung"). Die allgemeinste Gestalt der Bahn eines derart gebundenen Elektron ist eine (ebene) Ellipse; ihre Form, Größe und Orientierung hängt dabei von der Art der Erregung der Bewegung ab, welche letztere je nach Umständen thermisch, chemisch oder elektrisch sein kann.

Die Bewegung des Elektron gibt Veranlassung zur Aussendung elektrischer Schwingungen. Wir verstehen darunter, daß in der Umgebung des bewegten Elektron ein elektrisches Feld von periodisch wechselnder Größe und Richtung entsteht, das gesetzmäßig mit der Bewegung des Elektron verbunden ist. Um diese Beziehung einfachst auszusprechen, denkt man sich die Feldstärke an einer beliebigen Stelle q in der Nähe der Gleichgewichtslage p des Elektron durch eine Strecke mit dem Endpunkt in q repräsentiert, derart, daß Richtung und Größe der Strecke Richtung und Größe des Feldes angibt. Dann wird bei einem perio-

disch variabelen Feld der Endpunkt dieser Strecke eine geschlossene Kurve beschreiben. Diese Kurve liegt jederzeit in der Ebene normal zu der Verbindungslinie pq = l und ist geometrisch ähnlich der Projektion der Bahn des Elektron auf diese Ebene (Fig. 1). Ihre absolute Größe nimmt mit wachsender Entfernung indirekt proportional mit dieser ab.

Diese Regel ist für unten zu ziehende Folgerungen über Emissionseffekte wichtig.

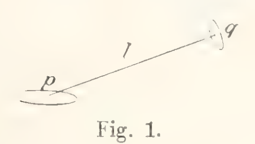


Fig. 1.

In den Lichtquellen wirken nun je eine große Anzahl von Elektronen zusammen, die unabhängig voneinander angeregt worden, und die ausgesandte Schwingung ist, als Superposition aller der Einzelemissionen, im allgemeinen unregelmäßig, wechselt nämlich Form und Orientierung der Schwingungsellipse sehr oft und regellos, behält aber die für die Farbe charakteristische Schwingungsfrequenz bei. Man bezeichnet eine solche Strahlung als natürliches Licht.

Durch eine Reihe von Hilfsmitteln (Reflexion, Doppelbrechung) kann man bekanntlich aus einem solchen Schwingungssystem Schwingungen absondern, die geradlinig nur nach einer Richtung hin stattfinden. Dies so gewonnene lineär polarisierte Licht wird entweder durch seine (zur Fortpflanzungsrichtung transversale) elektrische Schwingungs- oder die dazu normale sogenannte Polarisationsrichtung charakterisiert.

Man hat Mittel, aus lineär gemachtem Licht solches mit beliebigen elliptischen, im Grenzfall zirkularen Schwingungen herzustellen. Die Mittel zur Herstellung dieser verschiedenen Polarisationszustände dienen umgekehrt auch dazu, dieselben zu erkennen. Wir können also bei einem elliptisch polarisierten Lichtstrahl durch Beobachtung feststellen, welches das Verhältnis und welches die Orientierung der Achsen der Schwingungsellipse ist, auch in welchem Sinne dieselbe umlaufen wird. Die Fragestellung vereinfacht sich in den extremen Fällen geradliniger oder zirkularer Schwingung. Ein Drehungssinn wird in der Optik der Regel nach von derjenigen Richtung aus beurteilt und charakterisiert, nach welcher hin das Licht fortschreitet, und eine Drehung, die hierbei dem Uhrzeiger entgegenläuft, als positiv bezeichnet. —

Wie schon im Eingang gesagt, sind magnetooptische Effekte sowohl bei dem Vorgang der Emission des Lichtes — d. h. bei Einwirkung des Magnetfeldes auf eine Lichtquelle — als bei Absorption resp. Fortpflanzung des Lichtes — d. h. bei Einwirkung des Feldes auf einen durchstrahlten Körper beobachtet. Die ältesten Beobachtungen bezogen sich auf den letzteren Fall; Faraday entdeckte 1845 die Drehung der Polarisationsebene, welche ein Lichtstrahl erleidet, der einen im Magnetfeld befindlichen Körper parallel den Kraftlinien durchsetzt, Kerr 1875 die eigentümlichen Polarisationswirkungen der Reflexion des Lichtes an stark magnetischen Spiegeln. Aber diese an sich merkwürdigen Wahrnehmungen erwiesen sich nicht allgemeiner fruchtbar. Ihre große Bedeutung für die gesamte Optik erhielt die Magnetooptik erst durch die Entdeckung eines Emissionseffektes (Zeeman 1896/7), der dann auch die Veranlassung zur Auffindung weiterer Absorptionseffekte geworden ist.

2. Magnetooptische Emissionseffekte. Der magnetooptische Emissionseffekt, nach dem bereits Faraday gesucht hatte und der jetzt nach seinem Entdecker kurz der (direkte) Zeeman-Effekt genannt wird, besteht in einer Zerlegung der hellen Linien, welche die Spektren gewisser leuchtender Körper aufweisen, durch ein auf den betreffenden Körper ausgeübtes Magnetfeld, wobei sich gewisse Polarisationserscheinungen einstellen.

Die einfachste (normale) Form des Zeeman-Effektes ist die, daß bei Beobachtung längs der Kraftlinien des Feldes (longitudinal) die einfache Spektrallinie zerlegt erscheint in zwei Komponenten, beiderseitig der ursprünglichen Linie in gleichen und mit dem Feld proportional wachsenden Abständen gelegen, und zirkulare Schwingungen von entgegengesetzten Rotationsrichtungen aufweisend, Bei Beobachtung normal zu den Kraftlinien (transversal) findet eine Zerlegung in drei Komponenten statt, von denen die mittlere die ursprüngliche Lage bewahrt und Schwingungen parallel zu den Kraftlinien enthält; die Außenkomponenten stimmen der Lage nach mit den beim longitudinalen Effekt auftretenden überein, weisen aber lineäre Schwingungen normal zu den Kraftlinien auf.

Jede Veränderung der Emission einer Lichtquelle ist nach dem oben Bemerkten als eine Beeinflussung der Eigenschwingungen von Elektronen durch das Magnetfeld aufzufassen. Um den Zeeman-Effekt in seiner einfachsten Form zu verstehen, hat man zweierlei zu beachten.

2a) Zerlegung von Schwingungen.

Erstens kommt in Betracht, daß man für alle physikalischen Wirkungen die Schwingungen eines Elektron in Teilschwingungen oder Komponenten zerlegt denken darf, die nur an das Gesetz gebunden sind, daß sie, nach der Regel des Parallelogrammes zusammengesetzt, auf die wirkliche Schwingung führen. So kann man, um ein einfachstes Beispiel voranzuschicken, eine (ebene) elliptische Schwingung durch zwei geradlinige nach zwei zueinander normalen Richtungen R_1 und R_2 der Bahnebene ersetzen (s. Fig. 2), bei denen

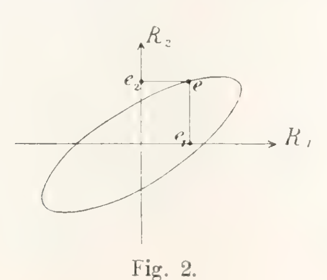


Fig. 2.

die gedachten Elektronen e_1 und e_2 sich so bewegen, wie die Projektionen des wirklichen Elektron e auf die Richtungen R_1 und R_2. Genau dasselbe gilt bezüglich einer elliptischen Bewegung und dreier zueinander normalen, aber gegen die Bahnellipse beliebig liegenden Richtungen R_1, R_2, R_3.

Man kann diese letztere Zerlegung vielleicht am einfachsten in zwei Stufen ausführen, indem man die gegebene Schwingung zunächst durch eine geradlinige nach R_3 und eine elliptische nach der Ebene R_1 R_2 (die Projektion der gegebenen Ellipse auf diese Ebene) ersetzt und letztere dann weiter in zwei geradlinige Schwingungen nach R_1 und R_2 zerlegt.

Eine andere Art der Zerlegung einer elliptischen Schwingung ist die in zwei zirkulare von entgegengesetzter Rotationsrichtung, welche durch Figur 3 erläutert wird, in der etwa der kleinere Kreis als die Bahn von e_1, der größere als die von e_2 angesehen werden mag. e_1 läuft dann in positivem, e_2 in negativem Sinne um den Mittelpunkt. Hier entsprechen sich die durch gleiche Zahlen bezeichneten Lagen der Elektronen e, e_1, e_2 gegenseitig, und jederzeit bestimmt sich die Lage von e aus denen von e_1 und e_2 nach der Regel des Parallelogramms.

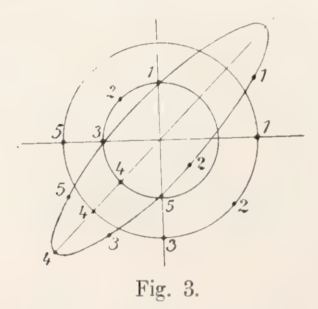


Fig. 3.

Eine Erweiterung dieser Zerlegung wird erhalten, indem man eine beliebig im Raume gelegene elliptische Schwingung zunächst in eine geradlinige nach R_3 und eine elliptische in der Ebene R_1 R_2 und letztere dann wieder in zwei zirkulare zerlegt.

Alle diese Komponenten einer elliptischen Schwingung, mögen es nun zwei oder drei, geradlinige oder zirkulare sein, haben mit dieser die gleiche Frequenz, vollenden nämlich ihren Umlauf innerhalb derselben Zeit.

2b) **Wirkung eines Magnetfeldes auf ein Elektron.** In zweiter Linie hat man das allgemeine Gesetz der Wirkung eines Magnetfeldes auf ein bewegtes Elektron heranzuziehen. Dies Gesetz (H. A. Lorentz 1892) geht dahin, daß das Elektron von einem solchen Feld eine Kraft erfährt, die normal zu der Ebene durch die Feld- und die Bewegungsrichtung steht und durch das Produkt aus Elektronenladung e, Feldstärke H, Geschwindigkeit V und dem Sinus des Winkels zwischen den Richtungen von H und V gemessen wird. Ein Elektron, das sich parallel der Richtung des Feldes bewegt, erfährt sonach von dem letzteren keinerlei Wirkung.

Handelt es sich aber etwa um ein Elektron, das gemäß S. 702 unter der Wirkung einer Attraktion Kr eine Kreisbahn um einen festen Punkt p beschreibt und um ein Magnetfeld, das normal zur Ebene der Bahn wirkt, dann liefert das obige Gesetz eine Kraft auf das Elektron in der Richtung des Kreisradius, gemessen durch das Produkt eHV, und zwar nach innen oder nach außen wirkend, je nach dem Sinn, in dem das Elektron um die Feldrichtung rotiert.

Läuft das Elektron einmal in einem Kreis vom Radius r_1, dann in einem solchen vom Radius r_2, oben nach S. 702 mit der gleichen Umlaufszeit T resp. der gleichen Frequenz $2\pi/T = \nu$, so sind die bezüglichen Geschwindigkeiten $v_1 = 2\pi r_1/T = r_1\nu$, $v_2 = 2\pi r_2/T = r_2\nu$; die vom Felde ausgeübten Kräfte werden somit in diesen beiden Fällen gleich $\pm e\nu H r_1$ und $\pm e\nu H r_2$; sie wachsen also mit den Entfernungen r und verhalten sich demnach genau so, wie die quasielastischen Kräfte, welche das Elektron an seine Ruhelage binden.

Hieraus ergibt sich: das wie angenommen wirksame Feld hat denselben Effekt, als wenn die quasielastische Kraft Kr um $\pm$ eHνr geändert würde, und zwar kehrt sich dieser Effekt mit der Rotationsrichtung und der Ladung des Elektron, wie auch mit der Richtung des Magnetfeldes um. Das Elektron kann sonach auch bei Einwirkung des

Feldes Kreisbahnen von beliebigem Radius mit einer vom Radius unabhängigen Umlaufsdauer beschreiben, aber diese Umlaufsdauer ist von der ursprünglichen verschieden, und zwar speziell bei Umkehrung der Rotationsrichtung in entgegengesetztem Sinne verschieden.

Das Quantitative folgt aus dem Gesetz für die Frequenz $\nu^2 = K/m$ von S. 702 bei Einführung der Veränderung von K durch das Magnetfeld; es gilt demnach

$$\nu_+{}^2 = \frac{K}{m} \pm \frac{eH\nu}{m} = \nu^2 \pm \frac{eH\nu}{m}$$

was in Annäherung, da $\frac{eH}{2m\nu}$ schon klein ist, mit

$$\nu_\pm = \nu + \frac{eH}{2m}$$

übereinstimmt.

2c) Der normale Zeeman-Effekt. Kombinieren wir dies Resultat mit dem oben über die Zerlegbarkeit einer elliptischen Schwingung Gesagten, so können wir die folgende Schlußreihe benutzen.

Die ursprüngliche elliptische Schwingung des Elektron läßt sich zerlegen in eine geradlinige parallel R_3 und zwei zirkulare von entgegengesetzter Rotationsrichtung um R_3 als Achse. Wird nun parallel R_3 das Magnetfeld H erregt, so erfährt nach dem Grundgesetz von S. 704 die Schwingung parallel R_3 keine Wirkung; von den beiden zirkularen Schwingungen erleidet aber die eine eine ebensostarke Vergrößerung der Frequenz, wie die andere eine Verkleinerung. Wir haben somit jetzt drei Komponenten von verschiedener Frequenz, die sich nun nicht mehr zu einer elliptischen Schwingung zusammensetzen lassen, sondern eine viel kompliziertere Bewegung ergeben.

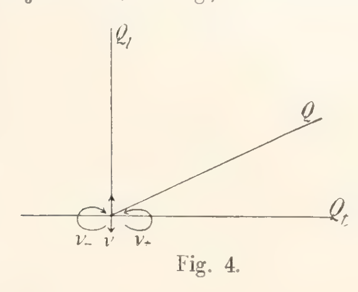


Fig. 4.

Ueber die Emission dieser Elektronenschwingung gibt die Regel von S. 703 Aufschluß. In einer beliebigen Richtung Q (Fig. 4) werden die Schwingungen mit den Frequenzen ν_-, ν, ν_+ wahrnehmbar sein mit Schwingungsformen, welche durch die Projektionen der bezeichneten drei Elektronenbahnen auf die Ebene normal zu Q dargestellt werden. Diese reduzieren sich bei longitudinaler Beobachtung (parallel zu Q_l), da hier die geradlinige Schwingung unwirksam wird, auf zwei zirkulare mit entgegengesetzten Umlaufsrichtungen und mit den Frequenzen $\nu + \frac{eH}{2m}$, $\nu - \frac{eH}{2m}$.

Die spektrale Auflösung des longitudinal emittierten Lichtes wird sonach statt der ursprünglichen Spektrallinie an der ν entsprechenden Stelle beiderseits hiervon eine neue Linie ergeben in mit wachsendem Magnetfeld zunehmenden Entfernungen von der ersten Lage, und diese Linien werden nicht (wie die ursprüngliche) natürliches, sondern zirkularpolarisiertes Licht zeigen, bei der einen in entgegengesetzter Richtung, wie bei der anderen. Bei entgegengesetzter Beobachtungsrichtung werden auch die Rotationsrichtungen die entgegengesetzten sein.

Bei transversaler Beobachtung (parallel Q_t) geben die zirkularen Komponenten geradlinige Schwingungen von den Frequenzen $\nu + \frac{eH}{2m}$ und $\nu - \frac{eH}{2m}$, die normal zu den magnetischen Kraftlinien liegen (s-Schwingungen); hinzukommt die lineäre Schwingung mit der ursprünglichen Frequenz ν parallel zu den Kraftlinien (p-Schwingungen).

Die spektrale Auflösung des transversal emittierten Lichtes wird somit statt der einen Linie deren drei liefern. Von diesen bewahrt die mittlere den ursprünglichen Platz, ist aber geschwächt, denn sie enthält nur noch die Wirkung der einen Schwingungskomponente; die zwei anderen stimmen mit den bei longitudinaler Beobachtung auftretenden überein, haben aber nur die halbe Intensität sowohl jener, wie der Mittelkomponente, und enthalten Schwingungen normal zu den magnetischen Kraftlinien.

2d) Folgerungen. Dies ist in der Tat der einfachste Typ des direkten Zeeman-Effektes, wie er oben geschildert ist. Seine im Vorstehenden gegebene Erklärung läßt nun auch einiges über die Tragweite der Zeemanschen Entdeckung erkennen.

Einmal bestätigt das Auftreten des Zeeman-Effektes die aus manchen anderen Gesichtspunkten in der Physik schon früher eingeführte Vorstellung beweglicher elektrischer Ladungen in den ponderabeln Molekülen. Sodann gestattet seine Messung die Bestimmung des Vorzeichens dieser beweglichen Ladungen e und eine angenäherte Bestimmung des für sie charakteristischen Verhältnisses e/m, d. h. von elektrischer Ladung und träger Masse.

Das Vorzeichen von e bestimmt sich daraus, ob bei dem longitudinalen Effekt die positiv oder die negativ rotierende Welle eine Vergrößerung der Frequenz erhält, wenn das Feld in der Richtung der Fort-

pflanzung der Welle erregt wird; es findet sich in der erdrückenden Mehrzahl der Fälle negativ, so daß man das Gegenteil als eine Wirkung sekundärer Einflüsse aufzufassen gedrängt wird. Dies ist bedeutungsvoll, weil in den Fällen, wo uns sonst Elektronen begegnen, die bei ihrer Bewegung nicht ponderable Atome mit sich schleppen, insbesondere bei den Kathoden und β-Radiumstrahlen, diese sich stets negativ gefunden haben, während positive Elementarladungen nur an ponderablen Atomen haftend begegnen.

Das Verhältnis e/m berechnet sich für eine Spektrallinie nach der Formel $\nu_{-} - \nu = \frac{e}{m} H$ aus der durch das Magnetfeld bewirkten Trennung der Außenkomponenten des Zeemanschen Duplets oder Triplets, sowie man das wirksame Feld H kennt. Hier liegt nun allerdings eine Schwierigkeit vor, die darauf beruht, daß das innerhalb des Moleküls zur Wirkung gelangende Feld nicht notwendig mit dem von außen ausgeübten übereinstimmt. Die Bewegung der Elektronen im Molekül bewirkt nämlich ihrerseits ein magnetisches Feld, und da erstere durch das äußere Feld beeinflußt wird, so gilt dies auch von letzterem. Immerhin wird man eine sehr große Differenz zwischen dem äußeren und dem inneren Feld im allgemeinen nicht für wahrscheinlich halten.

Von diesem Gesichtspunkt aus ist es nun höchst bemerkenswert, daß, wenn man das innere Feld dem äußeren gleich setzt, die Verwertung der Zerlegung von Spektrallinien in Duplets oder Triplets auf Werte e/m führt, die denen, welche sich aus den Beobachtungen an Kathodenstrahlen ergeben, sehr nahe liegen. Diese quantitative Beziehung gestattet den Schluß, daß es in der Tat dieselben elektrischen Elementarteile sind, die sich in den Kathoden- und β-Strahlen in freiem Zustand geltend machen, und die, im Molekülverband schwingend, die Emissions- und (wie unten zu zeigen) auch die Absorptionserscheinungen der Körper wesentlich bedingen. Das ist eine Erkenntnis von allergrößter Tragweite.

2e) Anormale Intensitäten. Das Eingreifen der Theorie zur Erklärung und Verwertung des normalen Zeeman-Effektes stellt eine der überraschendsten Leistungen aller physikalischen Theorie dar. Indessen haben sich an dem Effekt beim Fortschreiten der experimentellen Erforschung Komplikationen ergeben, die zu bewältigen und klarzustellen der Theorie bisher noch nicht völlig gelungen ist. Das Phänomen ist wesentlich reicher und mannigfaltiger, als es zunächst den Anschein hatte.

Daß die Triplets bezüglich des Gesetzes für die Größe der Zerlegung sehr bunt variieren, und daß man bei Festhaltung eines unveränderlichen Wertes von e/m gezwungen ist, die Erklärung in einer Abweichung des inneren (molekularen) Magnetfeldes von dem äußeren zu suchen, ist die geringste Schwierigkeit. Eine größere liegt bereits darin, daß viele Triplets nicht die normale Intensitätsverteilung — Außenkomponenten halb so stark wie Innenkomponenten — aufweisen. Die Beurteilung dieser Verhältnisse wird dadurch erschwert, daß wir ja niemals reine Emission beobachten, wie sie etwa eine unendlich dünne Schicht leuchtender Moleküle liefern würde, daß vielmehr in den meisten Lichtquellen die Emissionen der abgewandten Teile erst durch Absorption in den uns zugewandten geschwächt in unser Auge gelangen. Da stärkere Emission mit stärkerer Absorption nach einem bekannten Satz von Kirchhoff verknüpft ist, so steht zu erwarten, daß bei dem Triplet die stärker emittierte Mittelkomponente relativ zu den Außenkomponenten durch Absorption überwiegend geschwächt werden, also schließlich weniger Energie führen wird, als beide Außenkomponenten zusammen. In der Tat kann man nach H. A. Lorentz (1897) versuchen, so die Beobachtungen von Egoroff und Georgiewsky (1891) zu deuten, nach denen eine gefärbte Flamme zwischen Magnetpolen transversal Strahlungen aussendet, in denen die Schwingungen normal zu den Kraftlinien überwiegen. Aber nach neueren Beobachtungen scheinen die Verhältnisse doch komplizierter zu liegen. Manche Anzeichen deuten darauf hin, daß die einzelnen Moleküle der leuchtenden Körper anisotrop sind, nämlich Schwingungen von einer besonderen Richtung leichter oder schwerer emittieren, als dazu normale, und daß sie durch das Magnetfeld mehr oder weniger vollständig orientiert werden, so daß nun die p- oder die s-Schwingungen überwiegen.

2f) Kompliziertere Zerlegungen. Komplikationen ganz anderer Art entstehen dadurch, daß die Komponenten des Duplets und des Triplets ihrerseits wieder zerlegt werden, wobei die Symmetrie zur ursprünglichen Lage der bez. Spektrallinie der Regel nach gewahrt bleibt. Zerlegt sich nur die Mittellinie und nur in zwei Komponenten, so entsteht für transversale Beobachtung ein Quadruplet

| | | |
s p p s

das in sehr viel verschiedenen Typen (bis zu dem Ueberwiegen des Abstandes der p- über den der s-Komponenten) beobachtet worden ist. Zerlegen sich auch die Außenkomponenten, so treten transversale Sextu-

plets von nicht minder mannigfaltiger Gestaltung auf.

| | | | | |
s s p p s s

Bei longitudinaler Beobachtung werden jederzeit nur die s-Komponenten, und zwar als zirkulare Schwingungen wirksam.

Durch fortschreitende Zerlegung der Komponenten des Triplets in je 3, 4, 5, ... Linien entstehen weitere Komplikationen, und es ist eine Gesamtzahl der Komponenten einer einfachen Spektrallinie in der Höhe von etwa 18 erreicht worden.

Diese komplizierten Zerlegungen haben ein besonderes Interesse durch die Wahrnehmung gewonnen, daß sie in der Regel bei solchen Spektrallinien auftreten, welche die Einordnung in ein gesetzmäßiges Schema, eine „Serie“, gestattet haben, und daß sie bei allen Linien derselben Serie in gleicher Weise vorkommen. Sie deuten auf einen innigen Zusammenhang zwischen den Umständen, welche das Auftreten von Linienserien bedingen, und denjenigen, welche die komplizierten Zeeman-Effekte veranlassen. Die Aufgabe, einen Aufbau der Moleküle zu erfinden, welcher beides zugleich verständlich macht, ist besonders von W. Ritz (1908) in Angriff genommen worden, und das von ihm konstruierte geistreiche Modell, soviel Fragen es auch unbeantwortet läßt, ist immerhin ein erster Schritt in der bezeichneten Richtung. Freilich benutzt dasselbe ganz andere Vorstellungen als diejenigen, durch die H. A. Lorentz den normalen Zeeman-Effekt so überraschend erklärt hat, und das ist kein geringer Uebelstand.

Ritz leitet aus seinen Grundannahmen für die Frequenz der p-Komponenten das Gesetz

$$\nu_p = \nu + h\mu,$$

für diejenigen der s-Komponenten das andere

$$\nu_s = \nu + \mu' + h\mu$$

ab, wobei h alle möglichen ganzen Zahlen, μ und μ' je einen Parameter darstellt, und betrachtet die einfachen Formen der Quadruplets, Sextuplets usf. als nur durch Unmerklichwerden der überwiegenden Zahl der durch seine Gesetze geforderten Komponenten bewirkt, was nicht leicht zu begründen ist.

Ein früher nur empirisch von C. Runge gefundenes Gesetz für die Frequenzen bringt sowohl $\nu_p - \nu$ als $\nu_s - \nu$ in Zusammenhang mit der Zerlegung, die sich bei dem Normalwert von e/m aus den Formeln von Seite 705 ergibt, und sagt aus, daß diese Differenzen jederzeit ganzzahlige Vielfache ganzzahliger Bruchteile dieser Zerlegung sind. Dies Gesetz ist in den Fällen, wo man mit sehr kleinen Zahlen (2, 3, . . 6 etwa) auskommt, sehr überzeugend und eröffnet einen Zusammenhang zwischen den normalen und den komplizierten Zeeman-Effekten, zu denen das Ritzsche Modell nicht leitet.

Eine Erweiterung der in ihren Grundzügen S. 704 u. f. auseinandergesetzten Theorie des normalen Zeeman-Effektes hat gleich nach Entdeckung der ersten komplizierteren Fälle Lorentz (1897) selbst vorgenommen. Er denkt sich in jedem Molekül eine ganze Anzahl schwingungsfähiger Elektronen vorhanden und führt zwischen ihnen auf rein mathematischem Wege, ohne den Mechanismus des Vorganges im einzelnen klarzustellen, Koppelungen ein, die ihre Bewegungsfreiheit beschränken. Zur vollständigen Erklärung der beobachteten komplizierten Zerlegungen bedurfte es einer Modifikation des Lorentzschen Ansatzes, welche die p-Schwingungen und die s-Schwingungen nur je untereinander gekoppelt annimmt (Voigt 1907). Eine fruchtbarere Verwendung noch, als in der Theorie der Emissionseffekte, hat dieser Ansatz in derjenigen der Absorptionseffekte gefunden.

3. Magnetooptische Absorptionseffekte. 3a) Elektronentheorie der Absorption und Dispersion. Um die magnetooptischen Absorptionseffekte und ihre allgemeine Bedeutung verständlich zu machen, ist zuvörderst daran zu erinnern, welche Rolle überhaupt Absorptionseffekte in der neueren Lichttheorie spielen.

Wenn eine Lichtwelle einen ponderabeln Körper durchsetzt, innerhalb dessen Elektronen um Gleichgewichtslagen zu schwingen vermögen, so erregt sie diese letzteren und zwar um so stärker, je näher ihre eigene Schwingungsdauer der Eigenschwingung der Elektronen liegt. Die an die Elektronen abgegebene Energie fließt nur zum Teil in die Lichtwelle zurück, zum Teil wird sie von den Widerständen aufgezehrt, die der Elektronenbewegung entgegenwirken. So geschieht es, daß aus einer durch den Körper hindurchgehenden Welle, die verschiedene Frequenzen (d. h. also Farben) — im Grenzfall weißen Lichtes alle möglichen — enthält, ganz wesentlich nur diejenigen Schwingungen verschwinden, deren Perioden mit denjenigen übereinstimmen, die den Elektronen des Körpers eigen sind (auswählende Absorption). Da nun diese Eigenperioden die von dem Körper emittierten Farben bestimmen, so ist verständlich, daß (wie das ein bekannter Satz von Kirchhoff quantitativ formuliert) jeder hellen Linie im Emissionsspektrum eine dunkle („umgekehrte“) in dem Absorptionsspektrum entspricht, welches man erhält, wenn man weißes Licht den Körper durchsetzen läßt. Es mag daran erinnert werden, daß z. B. die dunklen (Fraunhoferschen) Linien im Sonnenspektrum gemäß dem Gesagten der Absorption entsprechen,

die das wesentlich weiße Licht des Sonnenkernes in der Sonnenatmosphäre erfährt.

Die Eigenschwingungen der Elektronen machen sich nun aber nicht nur in der Beeinflussung der Intensität, in der Absorption des durch den Körper gehenden Lichtes geltend, sondern auch in der Modifikation von dessen Geschwindigkeit, oder anders ausgedrückt, des Brechungsindex des Körpers, der ja durch den Quotienten aus der Lichtgeschwindigkeit im leeren Raum und derjenigen im Körper definiert ist. Der Zusammenhang des Brechungsindex n des Körpers mit seiner auswählenden Absorption geht nach der genaueren Theorie dahin, daß ohne Absorption n überhaupt konstant gleich Eins sein würde, daß jede Absorptionslinie aber in ihrer Umgebung auf der Seite kleinerer Frequenzen (d. h. nach rot hin) den Wert von n vergrößert, auf der Seite größerer Frequenzen (nach violett hin) verkleinert. Der hiernach entstehende Zusammenhang ist in Figur 5 veranschaulicht;

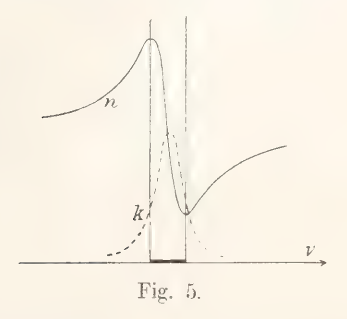


Fig. 5.

die ausgezogene Kurve stellt die Abhängigkeit des Brechungsindex, die punktierte diejenigen des Absorptionskoeffizienten von der Schwingungsfrequenz ν in der Umgebung eines einzelnen Absorptionsstreifens dar. Das Maximum und das Minimum von n liegt da, wo je der Absorptionskoeffizient k den halben Betrag seines maximalen Wertes $\bar{k}$ passiert. Außerhalb der hierdurch begrenzten Halbwertsbreite nimmt n mit wachsender Frequenz zu (normale Dispersion), innerhalb derselben aber ab (anormale Dispersion).

Enthält der Körper Elektronen mit verschiedenen Eigenfrequenzen, emittiert er also verschiedene Farben, so lagern sich die Wirkungen der entsprechenden Absorptionsstreifen auf den Brechungsindex übereinander, wie dies Figur 6 für zwei Streifen veranschaulicht.

3b) Gewöhnliche und zirkulare Doppelbrechung. In kristallinischen Körpern können die Elektronen nach drei zueinander normalen Richtungen X, Y, Z Schwingungen mit verschiedenen Frequenzen ν_1, ν_2, ν_3 ausführen, die sich, wie S. 705 in einem ähnlichen Falle hervorgehoben, dann nicht zu einer elliptischen Schwingung zusammensetzen; infolge hiervon würde solch ein Körper in der Richtung X Schwingungen resp. parallel zu Y und zu Z von den Frequenzen ν_2 und ν_3 emittieren, analog in der Richtung Y solche parallel zu Z und X

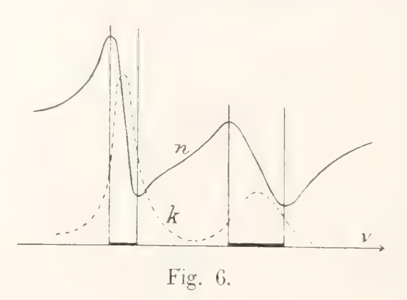


Fig. 6.

mit den Frequenzen ν_3 und ν_1 usf. Hierauf beruht, daß in einer parallel X fortschreitenden Welle die Schwingungskomponenten parallel zu Y und Z verschieden beeinflußt werden. Von ersterer werden hauptsächlich die Anteile mit der Frequenz ν_2, von letzterer die mit der Frequenz ν_3 absorbiert, und diesen verschiedenen Absorptionen entsprechen verschiedene Brechungsindizes n_2 und n_3. So erklärt sich auch die Doppelbrechung mit der sie begleitenden Polarisation in Kristallen durch eine Absorptionswirkung, resp. genauer durch die Verschiedenheit der Absorption für die verschiedenen Schwingungskomponenten.

Eine ähnliche Wirkung findet auch in denjenigen Körpern statt, welche die Polarisationsebene hindurchgehenden Lichtes drehen, und die als natürlich-aktiv bezeichnet werden.

Wir müssen uns vorstellen, daß in ihnen zirkulare Schwingungen einer durchstreichenden Welle bei verschiedenen Frequenzen ν_+ und ν_- maximal absorbiert werden, je nachdem sie bezüglich der Fortpflanzungsrichtung im + oder — Sinne umlaufen werden. Hierdurch würde dann den Wellen mit diesen Schwingungen auch ein verschiedener Brechungsindex n_+ oder n_- erteilt werden und jene zirkulare Doppelbrechung entstehen, die (wie zuerst Fresnel nachgewiesen hat) die eigentliche Ursache der charakteristischen Drehung der Polarisationsebene des Lichtes durch aktive Körper ist. Für den Zusammenhang der Drehung χ, die eine Schicht des aktiven Körpers von der Dicke D erteilt, mit den Brechungsindizes der beiden zirkularen Wellen gilt dabei die Beziehung $\chi = \frac{\pi D}{\lambda}(n_- - n_+)$; hierin ist χ in der früher charakterisierten Weise positiv gerechnet, λ bezeichnet die Wellenlänge des benutzten

Lichtes im leeren Raum, n_- ist der Brechungsindex für die negativ, n_+ für die positiv um die Fortpflanzungsrichtung rotierende Welle.

3c) Magnetische Zerlegung von Absorptionslinien. Das Vorstehende genügt nun, um die wichtigsten magnetooptischen Absorptionseffekte qualitativ verständlich zu machen, während natürlich auf eine Ableitung der quantitativen Gesetze hier verzichtet werden muß.

Zunächst ergibt sich aus den Gesichtspunkten von S. 707 u. f. unmittelbar, daß, wenn durch Einwirkung des Magnetfeldes die Emissionslinien irgendeine Zerlegung erfahren, das Gleiche für die Absorptionslinien stattfinden muß, die entstehen, wenn man durch den emittierenden Körper Licht von einer hinlänglich hellen weißen Lichtquelle hindurchgehen läßt. Dies bestätigt sich in der Tat in allem wesentlichen. Z. B. ergibt von den beiden gelben Linien des Natriumspektrums die hellere bei Emission und Absorption dasselbe Quadruplet, die schwächere dasselbe Sextuplet.

Hier mag die höchst merkwürdige Beobachtung von Hale (1909) Erwähnung finden, daß einige Absorptionslinien des Sonnenspektrums, die sich im allgemeinen einfach darstellen, in gewissen Partien der Sonnenoberfläche zerlegt erscheinen. Man darf hieraus mit Wahrscheinlichkeit schließen, daß an jenen Stellen die absorbierende Sonnenatmosphäre einem magnetischen Felde ausgesetzt ist. Da die bez. Zerlegungen Duplets aufweisen, wenn die Stellen nahe der Sonnenmitte liegen, Triplets, wenn sie gegen den Sonnenrand rücken, so ergibt sich, daß die Kraftlinien ungefähr radial aus der Sonne austreten.

3d) Rückschlüsse von den Effekten der Absorption auf die der Emission.

Immerhin liegen die Verhältnisse nicht ganz so einfach, wie die S. 705 entwickelte elementare Theorie der Emission zu ergeben scheint, und gerade die Behandlung der Absorptionseffekte hat hierauf die Aufmerksamkeit gelenkt. Jene Theorie betrachtet ein einzelnes Elektron und setzt die Emission einer Flamme derjenigen eines solchen Einzelgebildes stillschweigend qualitativ gleich. Nun aber beeinflussen die äußerst benachbarten Elektronen der Lichtquelle sich unzweifelhaft gegenseitig und schwingen im Verband derselben nicht ganz ebenso, als wenn sie voneinander unabhängig wären. Bei der Behandlung des Absorptionseffektes wird eine solche Einstimmung der verschiedenen Elektronen durch die hindurchstreichende Lichtwelle von allem Anfang an eingeführt; die auf diese Weise erhaltenen Gesetze erscheinen daher der Wirklichkeit mehr entsprechend, und man darf erwarten, daß auch die Folgerungen, die ihre Uebertragung auf den Emissionseffekt ergibt, sich in der Wirklichkeit bewähren werden.

Noch nach einer anderen Richtung scheint eine Theorie der magnetischen Absorptionseffekte weiter zu führen, als diejenige der Emissionseffekte. Es ist S. 707 bemerkt worden, daß sich eine Theorie der komplizierten Zerlegungen im Anschluß an die Lorentzsche Hypothese von gekoppelten Elektronen gewinnen läßt. Aber solange man sich auf den Emissionseffekt beschränkt, bleibt bei unserer Unkenntnis des Mechanismus der Schwingungserregung in den Molekülen das Gesetz für die relative Intensität der Komponenten einer komplizierten Zerlegung von vornherein unbestimmt, und selbst, wenn dem nicht so wäre, würde durch die oben erwähnte Unsicherheit über die wechselseitige Einstimmung zwischen verschiedenen Elektronen eine Unbestimmtheit entstehen. Diese Schwierigkeiten entfallen, wenn man den Absorptionsvorgang der Behandlung unterwirft; hier gelangt man ohne jede Willkür von der Annahme irgendeiner Art von Koppelung zu einem ganz bestimmten Gesetz für die Intensitätsverteilung der Absorption innerhalb der Komponenten einer Zerlegung, und der Kirchhoffsche Satz von Proportionalität zwischen Absorption und Emission läßt dasselbe Gesetz für die Emission erwarten.

3e) Die Dissymmetrie der Triplets. Unter derartigen Folgerungen aus der Theorie der magnetischen Absorptionseffekte bietet aus den eben entwickelten Gesichtspunkten besonders eine hervorragendes Interesse. Nach der elementaren Theorie soll gemäß S. 705 die Zerlegung der Emissionslinie in ein Triplet bei transversaler Beobachtung so geschehen, daß sich zwei Komponenten gleicher Stärke absondern und mit wachsender Feldstärke gleichmäßig von der feststehenden Mittellinie entfernen. Die Theorie des Absorptionseffektes verlangt hingegen, daß die nach Rot hin liegende Komponente kleineren Abstand und größere Stärke, die nach Violett hin liegende größeren Abstand und kleinere Stärke bewahren soll. Diese Dissymmetrie ist nach der Theorie äußerst gering und bisher nicht mit einiger Wahrscheinlichkeit durch die Beobachtung nachgewiesen.

Auffallend ist dabei, daß die Theorie diesen dissymmetrischen Effekt auf die transversale Fortpflanzung beschränkt, für die longitudinale aber dieselbe Symmetrie verlangt, welche die elementare Theorie ergibt. Man hat Analogien zu diesem Verhalten bei natürlich-aktiven Kristallen, wo die Fortpflanzung parallel der Hauptachse bis zu

einem gewissen Grade unabhängig von der normal dazu verläuft.

3f) Zirkulare magnetische Doppelbrechung. Das im vorstehenden geschilderte Verhalten der Absorptionslinien hat nach den S. 708 zusammengestellten Gesichtspunkten nun auch Erscheinungen der zirkularen und der gewöhnlichen Doppelbrechung zur Folge, die ein besonderes Interesse bieten, weil sie bei dem Emissionseffekt ein Analogon nicht besitzen (Voigt, 1898).

Bei longitudinaler Fortpflanzung erfahren der Regel nach die positiv rotierenden Schwingungen eine Absorption bei größeren, die negativen eine solche bei kleineren Frequenzen. Nach S. 708 folgt hieraus, daß die beiderseitigen Schwingungen in dem Körper auch mit verschiedener Geschwindigkeit fortschreiten, daß der Körper demgemäß zirkulare Doppelbrechung mit allen ihren Begleiterscheinungen aufweisen

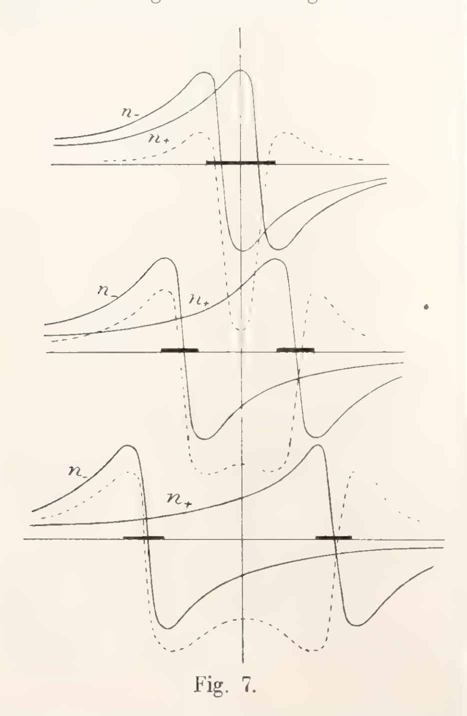


Fig. 7.

muß, insbesondere eine Drehung der Polarisationsebene hindurchgehenden Lichtes von dem Betrag

$$\chi = \frac{\pi D}{\lambda}(n_- - n_+).$$

Qualitatives und zum Teil auch Quantitatives über diese Erscheinung lehrt am einfachsten die geometrische Anschauung. Jede der beiden Komponenten, in welche durch das Magnetfeld die ursprüngliche Spektrallinie zerfällt, gibt Veranlassung zu demselben Verlauf des bez. Brechungsindex, den die Figur 5 darstellt, aber die beiden Kurven sind jetzt für die + und die — rotierende Welle um den Betrag der magnetischen Trennung der Komponenten gegeneinander verschoben. Die Figur 7 gibt in den ausgezogenen Linien diese Zerlegung der n-Kurven für Felder resp. Trennungen, die sich wie 1:3:5 verhalten, wieder; die punktierte Kurve gibt den Verlauf von $n_- - n_+$. Zugleich ist durch starke Linien auf der Horizontalachse in der Länge der Halbwertsbreite auf S. 708 eine Andeutung der ungefähren Breite der Absorptionslinien gegeben.

Die Betrachtung lehrt nun, daß außerhalb der Absorptionstreifen die Differenz $n_- - n_+$ beiderseitig positiv, zwischen den Komponenten der Zerlegung aber negativ ist, ferner, daß sie im Außenraum von den Absorptionslinien hinweg rapide abnimmt und bald zu einer ganz anderen Größenordnung abfällt. In Bereichen verschwindender Absorption wird hiernach die magnetische Drehung der Polarisationsebene relativ schwach sein, bei Annäherung an einen Absorptionsstreifen aber bedeutend zunehmen, besonders wenn derselbe zugleich schmal und kräftig ist. Daß diese schwächere Drehung sich nach der Theorie proportional mit der Feldstärke ergibt, sei ergänzend bemerkt.

3g) Die magnetische Drehung der Polarisationsebene. Das erstere in durchsichtigen Spektralbereichen eintretende Phänomen stellt die nach S. 703 von Faraday als erste beobachtete magnetooptische Erscheinung dar; seine Steigerung bei Annäherung an einen Absorptionsstreifen ist erst viel später (1898) von Macaluso und Corbino entdeckt worden.

Bezüglich des Sinnes dieser Drehung ist zu bemerken, daß im vorstehenden ein Fortschreiten des Lichtes parallel mit der positiven Feldrichtung vorausgesetzt ist; die Umkehrung einer dieser Richtungen führt zu entgegengesetzter Drehungsrichtung. Hierdurch unterscheidet sich die magnetische Aktivität wesentlich von der S. 708 erwähnten natürlichen Aktivität, die bei entgegengesetzten Fortschreitungsrichtungen gleichsinnige Drehung bewirkt. Der Fall, daß in Spektralbereichen verschwindender Absorption eine positive Drehung stattfindet, ist der häufigste; es finden sich aber auch Körper mit negativer Drehung. Will man nicht positive Elektronen zulassen, was auf größte Schwierigkeiten führt, so bleibt zur Erklärung dieser Anomalie kaum etwas anderes übrig, als die Annahme, daß unter Umständen in Molekülen magnetische Felder auftreten können von entgegengesetzter Richtung zu denen im Außenraum. Man hat analoge Annahmen bereits bei der Theorie des Diamagnetismus benutzt.

Die Beobachtungen an merklich durchsichtigen Körpern, oder in Bereichen unmerklicher Absorption, haben eine Proportionalität der Drehung χ mit der Stärke H des ausgeübten Magnetfeldes ergeben, wie das nach S. 710 die Theorie verlangt. Eine Proportionalität mit der Dicke der durchstrahlten Schicht ist bereits S. 708 erwähnt. Setzt man hiernach $\chi = pDH$, so wird p als Verdetsche Komponente bezeichnet. Ihre Bestimmung ist das Ziel vieler Beobachtungen gewesen.

Die so gefundenen Drehungen halten sich bei einer durchstrahlten Länge von 1 cm und einer einwirkenden Feldstärke von 10000 Gauß für feste und flüssige Körper meist in der Höhe weniger Grade, bei Gasen in derjenigen von Bruchteilen von Minuten. Dagegen beträgt die Drehung in Na-Dampf unter ähnlichen Umständen in der unmittelbaren Umgebung der Absorptionslinien Hunderte von Graden, was die Aussagen der Theorie in schöner Weise bestätigt. Das Gesetz der Abhängigkeit der Drehung vom Abstand von der Absorptionslinie ist zuerst von Hallo (1902) untersucht und im Einklang mit der Theorie erwiesen worden.

Das Verhalten der Drehung zwischen den Komponenten einer Zerlegung hat Zeeman (1902) ausführlich untersucht und den Aussagen der Theorie völlig konform gefunden. Insbesondere hat sich dabei auch die aus Figur 7 unmittelbar ersichtliche, aber an sich auffallende Tatsache ergeben, daß die Drehung zwischen den Komponenten in dem beobachtbaren Bereich mit wachsender Feldstärke nicht zu „sondern“ abnimmt.

Figur 7 und die an sie vorstehend angeschlossenen Folgerungen beziehen sich auf den Fall der Zerlegung einer Absorptionslinie in ein Duplet; die Theorie gestattet indessen auch kompliziertere Fälle zu behandeln.

Eine Ausnahmestellung nahmen bez. der magnetischen Drehung der Polarisationsebene die stark magnetisierbaren Metalle Eisen, Nickel, Kobalt ein, die zuerst von Kundt (1884), dann von Dubois (1887) und Lobach (1889) in äußerst dünnen und für durchgehendes Licht schwach durchsichtigen Schichten der Beobachtung unterworfen worden sind. Diese Metallschichten zeigen bei spektraler Zerlegung des hindurchgehenden Lichtes keine nennenswerte Veränderlichkeit der Absorption mit der Farbe, insbesondere keine Absorptionsstreifen. Trotzdem ergab sich auf gleiche wirkende Dicken und Feldstärken reduziert die Drehung etwa 100000 mal stärker, als bei den durchsichtigen Körpern, außerdem aber wich die Drehung erheblich von der Proportionalität mit der Feldstärke ab und verlief vielmehr sehr nahe parallel der Stärke der Magnetisierung, die bekanntlich nicht mit gesteigerter Feldstärke unbegrenzt wächst, sondern einem Grenzwert (Sättigungswert) zustrebt.

Eine befriedigende Theorie dieses Verhaltens fehlt noch, trotz eines beachtenswerten Versuchs von Drude (1899).

3h) **Magnetische lineare Doppelbrechung.** Gehen wir nun zu den Begleiterscheinungen des transversalen Zeeman-Effektes über, so genügen auch zu ihrer Erläuterung die allgemeinen Gesichtspunkte von S. 708 usw. Nach dem S. 705 Gesagten gehören im Magnetfeld geradlinigen Schwingungen parallel den Kraftlinien (p) andere Absorptionsstreifen zu, als solchen senkrecht dazu (s); es gehören ihnen demnach auch andere Geschwindigkeiten zu, und dies ergiebt, daß ein Körper im Magnetfeld bei transversaler Beobachtung gewöhnliche Doppelbrechung zeigen muß. Mißt man die Doppelbrechung durch die Differenz der Brechungsindizes $n_s - n_p$, so kann man von deren Verlauf sich ebenso mit Hilfe geometrischer Anschauung eine Vorstellung bilden, wie oben bezüglich der Differenz $n_- - n_+$ und der Drehung χ gezeigt ist.

Fig. 8 (in doppelten Dimensionen wie Fig. 7) gibt ausgezogen die beiden n-Kurven für die p- und s-Schwingung in

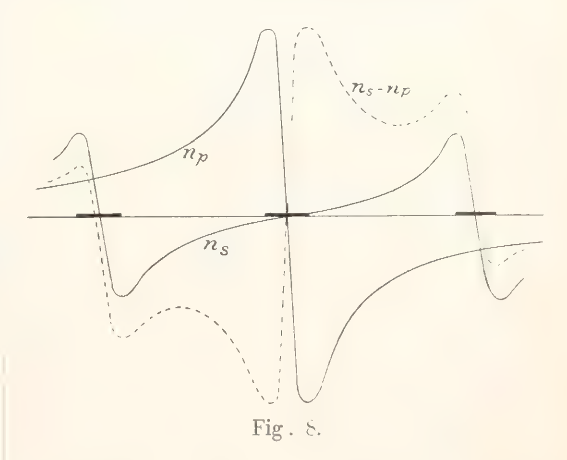


Fig. 8.

einer Position wieder, die der größten Zerlegung in Figur 7 entspricht. Die starken Linien auf der Horizontalachse veranschaulichen die Lage der drei Absorptionsstreifen. Durch eine punktierte Kurve ist der hieraus sich ergebende Verlauf von $n_s - n_p$ dargestellt. Letzterer weicht von dem aus den früheren Kurven ersichtlichen von $n_- - n_+$ mehrfach wesentlich ab. Im Raum außerhalb des Triplets ist links $n_s - n_p$ positiv, rechts negativ, die Doppelbrechung hat also beiderseits der Absorptionslinie entgegengesetzten Charakter. Zwischen den Komponenten ist $n_s - n_p$ rechts positiv, links negativ.

Uebereinstimmend mit dem Verhalten von $n_{-}-n_{+}$ ist, daß n_s-n_p im Außenraum, bei Entfernung von der Absorptionslinie, rapide abnimmt, und die Theorie zeigt, daß die Größe, auf welche dabei n_s-n_p herabsinkt, noch geringer ist, als die, welche $n_{-}-n_{+}$ erreicht. Dies letztere Resultat ist nicht auf den hier zunächst vorausgesetzten Fall einer Zerlegung in ein Triplet beschränkt, sondern gilt für jede Art von Zerlegung, — ebenso das hier nur zu Erwähnende, daß weitab von Absorptionsstreifen die Doppelbrechung mit dem Quadrat der Feldstärke wächst.

Im durchsichtigen Gebiet ist diese von der Theorie geforderte Doppelbrechung wegen ihrer Kleinheit bisher dem experimentellen Nachweis unzugänglich; dagegen hat sich ihre Existenz und ihr ganzes den oben gezogenen Folgerungen entsprechendes Verhalten in der unmittelbaren Umgebung der Absorptionslinien von Na-Dämpfen nachweisen lassen (Voigt, 1898). Wenig später ist von Cotton (1898) unabhängig durch eine einfachere Beobachtungsmethode summarisch das Vorhandensein ausnahmsweise starker Doppelbrechung in der Umgebung derselben Linien nachgewiesen worden. Das eigentümliche Verhalten der Doppelbrechung zwischen den Komponenten eines Triplets ließ sich in Strenge lange Zeit nicht experimentell verifizieren, da keine Lichtquelle bekannt war, die sich zu Absorptionsversuchen mit einem Zeemanschen Triplet eignet. Dagegen haben Zeeman und Geest (1904) an der schwächeren D-Linie, deren Sextuplet in Annäherung als ein doppeltes Triplet aufgefaßt werden kann, die bezüglichen Erscheinungen qualitativ nachgewiesen. Erst in neuester Zeit ist an der roten Linie des Lithiumspektrum ein Absorptionstriplet festgestellt und an diesem der typisch einfachste Fall der magnetischen linearen Doppelbrechung, wie ihn Fig. 8 darstellt, nachgewiesen worden (Voigt und Hansen 1912).

3i) Doppelbrechung durch sekundäre Umstände. Durch spätere Beobachtungen ist neben der vorstehend beschriebenen und erklärten transversalen Doppelbrechung im Magnetfelde noch eine weitere festgestellt worden, die auf ganz andere Weise zustande kommt, als die obige. Jene zweite Art der Doppelbrechung findet sich bei schwach absorbierenden Körpern und folgt dem Gesetz der Proportionalität mit dem Quadrate der Feldstärke, das auch bei der ersten Art galt und überhaupt nach der Symmetrie des Vorganges in jedem Falle gelten muß. Sie unterscheidet sich von der ersten aber durch beträchtlichere Größe und durch das Gesetz der Dispersion.

Zunächst hat Majorana (1902) entdeckt, daß gewisse Eisenlösungen, insbesondere alte Lösungen von Eisenoxyd, im Magnetfeld beträchtlich transversal doppeltbrechend werden, und zwar so, daß die Komponenten der Schwingung parallel und normal zu den Kraftlinien sich sowohl bezüglich des Brechungsindex, als bezüglich der Absorption unterscheiden. Es ist u. a. von Schmauß wahrscheinlich gemacht worden, daß diese Doppelbrechung im Grunde nicht durch das Feld entsteht, wie dies bei der oben besprochenen ersten stattfindet, sondern daß sie von vornherein in den gelösten Partikeln vorhanden ist, und daß sie durch das Magnetfeld nur zur Geltung gebracht wird, insofern dieses die ursprünglich ungeordneten Partikeln parallel richtet.

Ein analoger Vorgang scheint bei der magnetischen Doppelbrechung verschiedener einfachen Flüssigkeiten, insbesondere organischen der aromatischen Reihe vorzuliegen, welche Cotton und Mouton (seit 1907) untersucht haben, nur daß hier nicht die Partikeln der gelösten Substanz, sondern die Moleküle der Flüssigkeit selbst anisotropen Charakter haben und durch die Wirkung des Magnetfeldes parallel gerichtet werden.

Die Abhängigkeit des Effektes vom Magnetfeld kommt in beiden Fällen auf die Weise zustande, daß die doppeltbrechenden Partikeln oder Moleküle, während sie sich einzustellen suchen, infolge der Wärmebewegung mit anderen zusammenstoßen und so immer wieder in ungeordnete Lagen gebracht werden, wo ihre Anisotropie nicht zur Geltung kommt. Je stärker das Feld ist, um so weiter wird die Orientierung in der Zeit zwischen zwei Zusammenstößen sich ausbilden können, um so beträchtlicher wird also die Doppelbrechung sein. Langevin (1910) hat diesen Vorgang einer eindringenden Untersuchung unterworfen.

3k) Magnetooptische Effekte in gegen das Magnetfeld geneigten Richtungen. Bis hierher ist nur von den beiden Grenzfällen der longitudinalen und der transversalen Fortpflanzung des Lichtes im Magnetfeld die Rede gewesen; indessen bietet auch diejenige in schiefer Richtung gegen die Kraftlinien ein gewisses Interesse, besonders unter dem schon S. 708 erörterten Gesichtspunkt der Gegensätze zwischen den Aussagen der (elementaren) Emissions- und der Absorptionstheorie. Die ersten Beobachtungen Righi's (1899) über schiefe Emission schienen mit den Aussagen der elementaren Theorie verträglich; es ist aber nahezu sicher, daß dieselben unter Umständen stattfanden, wo die bezüglichen Differenzen unmerklich waren. In der Tat ist ja auch der theoretisch verlangte Gegensatz bei

transversaler Beobachtung (die Dissymmetrie der Triplets) bei einer vollständigen Zerlegung einer sehr feinen Spektrallinie nicht wahrnehmbar, und unter diesen Umständen gibt die Theorie (Voigt, 1899) auch für schiefe Fortpflanzungsrichtung nur sehr schwache Abweichungen.

Beträchtlicher werden letztere nach Lorentz (1911) im Falle breiter Spektrallinien und unvollständiger Zerlegung, und die Theorie führt hier zu merkwürdigen Folgerungen, die von Zeeman (1911) mittels Beobachtungen des Absorptionsphänomens teilweise haben bestätigt werden können. Insbesondere ist von Interesse, daß bei allmählich steigender Neigung der Fortpflanzungsrichtung gegen die Kraftlinien an der Stelle der Mittelkomponente des Triplets die Polarisationen der beiden sich fortpflanzenden Wellen aus zirkularen in elliptische und schon bei einem von 90° verschiedenen Neigungswinkel ϑ in lineäre übergehen, die gegen die Meridianebene geneigt sind. Zwischen 0° und ϑ sind die Geschwindigkeiten der beiden Wellen verschieden, aber ihre Absorptionen einander gleich; das Umgekehrte findet statt zwischen ϑ und 90°. Aehnliches gilt für die Mitte bei komplizierteren Zerlegungen.

3l) Magnetische Drehung der Polarisationsebene in Kristallen. Bei Kristallen sind magnetooptische Absorptionseffekte beobachtet worden, die in mehrfacher Hinsicht von den bei isotropen Körpern vorkommenden abweichen. Die einfache Drehung der Polarisationsebene im durchsichtigen Spektralgebiet (Faradayeffekt) läßt sich bei ihnen nur für Licht, welches sie parallel einer optischen Achse durchsetzt, bewirken; für alle anderen Richtungen kompliziert sich der Vorgang durch die Einwirkung der natürlichen lineären Doppelbrechung, und eine magnetische Wirkung bleibt überhaupt nur bei Fortpflanzungsrichtungen nachweisbar, die sehr kleine Winkel mit einer optischen Achse einschließen. Die magnetischen Drehungen, welche hier gefunden sind, liegen durchaus im Bereich der bei isotropen Körpern beobachteten. Von Interesse ist aber die nachstehende Frage.

Bei gewissen Kristallen der beiden niedrigst-symmetrischen Systeme sind die Richtungen der beiden optischen Achsen einander kristallographisch ungleichwertig; so insbesondere bei Kristallen des monoklinen Systems dann, wenn sie in der Ebene normal zur ausgezeichneten Achse liegen, welche auch optische Symmetrieebene ist. Es ist von vornherein dann die Möglichkeit gegeben, daß bei einem solchen Kristall die magnetische Drehung für Licht, welches parallel der einen Achse fortschreitet, eine andere Größe besitzt, als für Licht, welches sich längs der anderen fortpflanzt. Die Beobachtung hat bei Rohrzucker diese Vorhersage der Theorie bestätigt (Voigt und Honda 1908); allerdings ist der Unterschied der beiden Drehungen klein und die Messung nicht ohne Schwierigkeit.

3m) Zeeman-Effekte bei Kristallen. Ganz überraschende magnetooptische Effekte hat J. Becquerel (seit 1906) bei Kristallen entdeckt, die Verbindungen seltener Erden (Didym, Cer usf.) enthalten, wie z. B. Xenotim und Tysonit.

Diese Kristalle sind optisch einachsig und geben im Absorptionsspektrum zahlreiche feine dunkle Linien, deren Schärfe sich durch Anwendung niedrigster Temperaturen (—188° C z. B.) derartig steigern läßt, daß sie sich in ihrem Aussehen nicht mehr allzuviel von den Absorptionslinien der Dämpfe unterscheiden. Den beiden in jeder Richtung mit zwei verschiedenen Geschwindigkeiten fortgepflanzten Wellen entsprechen nach S. 708 auch verschiedene Absorptionen, und bei den genannten Kristallen ist die Verschiedenheit so groß, daß die Absorptionsspektren für die ordentliche und die außerordentliche Welle vollkommen verschieden erscheinen. Bei Beobachtung parallel der optischen Achse kommt nur das ordentliche Spektrum zur Geltung, bei derjenigen normal zur Achse entspricht der elektrischen Schwingung normal zur Achse das (gleiche) ordentliche, derjenigen parallel zur Achse das außerordentliche Spektrum.

Nach Symmetrie mußte bei Einwirkung eines Magnetfeldes in der Richtung der Hauptachse dieser optisch einachsigen Kristalle und bei einer Beobachtung in derselben Richtung der Effekt mit dem unter denselben Umständen bei isotropen Körpern, z. B. absorbierenden Dämpfen, stattfindenden qualitativ übereinstimmen; in der Tat wurde hier auch bei zahlreichen Absorptionslinien eine Zerlegung in Duplets beobachtet. Aber diese Duplets hatten äußerst verschiedene Abstände, und es kamen unter ihnen Zerlegungsweiten vor, die alle bei Dämpfen beobachteten erheblich übertrafen. Bei dieser Anordnung wurde dann auch die nach S. 710 u. f. mit der Zerlegung der Absorptionslinien in Beziehung stehende singuläre zirkulare Doppelbrechung und Drehung der Polarisationsebene ganz ähnlich beobachtet, wie bei absorbierenden Dämpfen.

Wirkte das Magnetfeld normal zur optischen Achse, und wurde dann parallel dem Feld, oder parallel der Achse oder normal zu beiden beobachtet, oder wirkte das Feld parallel der Achse und wurde normal dazu beobachtet, so ergaben sich vielfach Erscheinungen von ganz anderem Charakter,

als bei den Dämpfen, insbesondere einseitige Verbreiterungen oder Verschiebungen oder unsymmetrische Zerlegungen, die nicht der Feldstärke selbst, sondern dem Quadrat derselben proportional verliefen, also ihren Charakter bei Umkehrung des Feldes bewahrten. Außerdem ergaben mehrfach verschiedene Beobachtungsarten, die sich auf dieselbe (ordentliche oder aber außerordentliche) Welle bezogen, überraschenderweise das gleiche Verhalten der Absorptionslinien bei Erregung des Feldes; so z. B. verhielt sich bei einer Lage des Feldes normal zur optischen Achse das ordentliche Absorptionsspektrum in gleicher Weise, gleichviel, ob die Beobachtungsrichtung parallel der optischen Achse (also transversal) oder parallel dem Felde (also longitudinal) stattfand. Endlich zeigten sich in gewissen Fällen in der nächsten Umgebung von Absorptionslinien beträchtliche Veränderungen der natürlichen Doppelbrechung der Kristalle durch das Magnetfeld, die den S. 711 beschriebenen bei Dämpfen in vieler Hinsicht parallel gingen.

Diese neuen Erscheinungen boten der Theorie interessante Aufgaben; es gelang indessen durch Anwendung derselben Grundsätze, welche eine Erklärung der komplizierten Zeeman-Effekte ermöglicht hatten, unter Einführung der durch die kristallinische Struktur gebotenen Erweiterungen, ihnen gerecht zu werden (J. Becquerel, Voigt, 1906/8).

3n) Magnetooptische Wirkungen bei normaler Reflexion. Die Effekte, welche die Erregung von Magnetismus in ferromagnetischen Körpern auf das von ihnen reflektierte Licht ausübt, scheinen auf den ersten Blick nicht unter die hier besprochenen magnetooptischen Absorptionseffekte zu gehören. Indessen ist doch das, was in letzter Instanz wirksam ist, das geänderte Verhalten des erregten Körpers gegen die in ihm fortschreitende Welle; diese Veränderung wirkt dann auf die reflektierte Welle zurück, die durch gewisse Bedingungen mit der eindringenden verkoppelt ist. Und da die optischen Eigenschaften eines Körpers in erster Linie durch seine Absorptionen bedingt sind, so haben wir es bei diesem „magnetischen Kerr-Effekt" (s. S. 703) in der Tat mit einem Absorptionseffekt zu tun, — der allerdings einen anderen Charakter hat, als die bisher besprochenen.

Die einfachste Form, welche dieser Kerr-Effekt annimmt, tritt ein, wenn lineär polarisiertes Licht in normaler Richtung auf eine spiegelnde Begrenzungsfläche eines Präparates von Eisen, Nickel oder Kobalt auffällt, aus der die magnetischen Kraftlinien gleichfalls normal austreten. Dieser Fall wird am besten so realisiert, daß eine dünne Platte aus der betreffenden Substanz an das eine Polstück eines Elektromagneten angelegt wird und das Licht durch eine Bohrung in dem anderen, sehr nahe gebrachten Polstück normal auf die Platte geleitet wird. Das reflektierte Licht zeigt dann schwach elliptische Polarisation, wobei die große Achse der Schwingungsellipse gegen die Polarisationsrichtung des einfallenden Lichtes entgegen dem Sinne der magnetisierenden Ströme gedreht ist.

Dieser Effekt, der von Kerr (1877) als erster untersucht und später von Righi (1885), Dubois (1890), Zeeman (1895), Dziewulski (1912) behandelt worden ist, wächst analog wie die Magnetisierung mit wachsender Feldstärke nur bis zu einem Sättigungswert; er nimmt bei Eisen und Kobalt mit wachsender Schwingungsfrequenz (d. h. nach Violett hin) innerhalb des ganzen sichtbaren Spektrums ab, besitzt aber bei Nickel ein Minimum im Gelben.

Obwohl die beschriebene Anordnung keineswegs die Wirkungen der Magnetisierung besonders groß macht, hat sie doch vor denjenigen, die mit schiefer Inzidenz operieren, den Vorteil voraus, daß fremde Oberflächenschichten, die kaum zu vermeiden sind und bei schiefen Inzidenzen nach Micheli (1900) beträchtlichen Einfluß auf die Erscheinungen gewinnen können, hier nach Symmetrie keine Wirkung üben können. Daher ist sie für die Bestimmung magnetooptischer Konstanten und für die Prüfung der theoretischen Beziehungen zwischen Faraday- und Kerr-Effekt von großer Bedeutung.

In dem zweiten Extremfalle, daß die Kraftlinien die spiegelnde Fläche nicht normal durchsetzen, sondern der Fläche parallel verlaufen, findet ein merklicher Effekt auf normal reflektiertes Licht überhaupt nicht statt.

3o) Effekte bei schiefer Reflexion. Die Beobachtungen bei schiefer Inzidenz geben einander verwandte Resultate in den beiden Fällen, daß die Kraftlinien entweder normal aus der spiegelnden Fläche austreten oder aber in derselben parallel zur Einfallsebene verlaufen; derartige Messungen sind wiederum zuerst von Kerr (1877), dann, in vollkommener Weise, besonders von Righi (1885) und Sissingh (1891) angestellt worden, und bezogen sich hauptsächlich auf zweierlei spezielle Aeußerungen des magnetooptischen Effektes.

Einmal wurden diejenigen Stellungen des Analysators aufgesucht, wo bei einfallender Schwingung parallel oder normal zur Einfallsebene die wahrgenommene Intensität ein Minimum wurde, oder es wurden bei Stellung des Analysators parallel oder normal zur Einfallsebene die bezüglichen Einstel-

lungen des Polarisators aufgesucht (Methode der Minimumdrehungen).

Zweitens wurden diejenigen zusammengehörigen Stellungen von Polarisator und Analysator aufgesucht, für welche eine vollständige Auslöschung des reflektierten Lichtes gelang, für welche also das reflektierte Licht lineär, und zwar normal zur Schwingungsrichtung des Analysators schwang. Diese Stellungen lagen immer nahe der Parallelen und der Normalen zur Einfallsebene (Methode der Nullstellungen).

Bei jeder der beiden Methoden kommen vier beobachtbare Winkel in Frage, und die Beobachtung hat gelehrt, daß von ihnen je zweimal zwei Werte einander absolut oder entgegengesetzt gleich sind (Reziprozitätssätze des Kerr-Effektes).

Bei der Reflexion an einem Spiegel, in der die magnetischen Kraftlinien parallel der Grenzfläche und zugleich normal zur Einfallsebene verlaufen, hat der magnetooptische Effekt einen ganz anderen Charakter und äußerst geringe Intensität. Er tritt nur auf, wenn die Schwingungen des einfallenden lineärpolarisierten Lichtes schief gegen die Einfallsebene liegen, am besten unter 45° gegen dieselbe geneigt sind.

Unter solchen Umständen ist auch bei Reflexion an einem nicht magnetisierten Spiegel das reflektierte Licht elliptisch polarisiert. Der Einfluß des Magnetfeldes äußert sich hier nur in einer geringen Aenderung der Form und der Orientierung der Schwingungsellipse (Zeeman, 1896).

Die Elektronentheorie des Faraday- und Zeeman-Effektes, von der oben gehandelt worden ist, führt ohne irgend wesentliche Willkür zu einer Theorie des magnetischen Kerr-Effektes, und die oben besprochenen empirischen Resultate stimmen mit ihren Aussagen überein. Noch nicht völlig klargestellt ist bisher, ob auch die theoretisch geforderten quantitativen Beziehungen zum Faraday-Effekt, namentlich bei verschiedenen Farben, durch die Erfahrung bestätigt werden. Für die Entscheidung solcher Fragen müßten vor allen Dingen die Beobachtungen möglichst weit in die ultraroten und ultravioletten Spektralgebiete ausgedehnt werden.

Literatur. ***A. Cotton,*** *Le Phénomène de Zeeman. Scientia N. 5, Paris 1899.* — ***H. A. Lorentz,*** *Théorie des Phénomènes Magnétooptiques. Rapports Congr. de Phys. Paris 1900.* — ***P. Zeeman,*** *Progrès récents en magnétooptique, Le Radium, IV, N. 2, 1907.* — ***C. Runge,*** *Schwingungen des Lichtes im magnetischen Felde. In H. Kayser, Spektroskopie Bd. II, Kap. IX.* — ***W. Voigt,*** *Magneto- und Elektrooptik. Leipzig 1908.* — ***H. A. Lorentz,*** *The Theory of Elektrons. Leipzig 1909.*

W. Voigt.

Magnus

Heinrich Gustav.

Geboren am 2. Mai 1802 in Berlin, gestorben am 4. April 1870 ebenda. Er studierte in Berlin, Stockholm und Paris, habilitierte sich 1831 für Technologie und Physik, trat 1869 in den Ruhestand. Magnus hat eine große Reihe von Arbeiten auf dem Gebiet der Chemie und Physik angestellt; er bestimmte den Ausdehnungskoeffizienten verschiedener Gase und die Spannkraft der Dämpfe, lieferte Untersuchungen über Elektrolyse, Hydraulik, strahlende Wärme, entdeckte verschiedene Säuren und ein nach ihm benanntes Platinsalz.

Literatur. ***Helmholtz,*** *Rede zum Gedächtnis an G. Magnus, Berlin 1871.* — ***Hofmann,*** *Zur Erinnerung an G. Magnus, Berlin 1871.*

E. Drude.

Mallet

Robert.

Geboren am 3. Juni 1810 in Dublin, wo sein Vater eine Eisengießerei besaß. 1826 besuchte er das Trinity College und trat nach Vollendung seiner Studien 1831 als Zivilingenieur in das Geschäft seines Vaters ein. Er wurde bald bekannt durch seine Bewunderung erregenden Unternehmungen, besonders durch seine kühnen Brücken- und Eisenbahnbauten. Auch durch technische Erfindungen wurde er berühmt. 1854 wurde er Mitglied der Royal Society. Später widmete er sich mehr theoretischen Studien und gab in London eine Zeitschrift Practical Mechanic's Journal 1865 bis 1869 heraus. Wegen seiner Verdienste um die Wissenschaft erhielt er 1859 die Telford-Medaille und den Preis des Institution of Civil Engineers, 1862 die Cunnigham-Medaille der Royal Irish Academy, 1877 die goldene Wollaston-Medaille der Geological Society. Er starb am 5. November 1881 zu Enmore.

Um die Geologie hat er sich vor allem durch seine Forschungen über Vulkanismus und Erdbeben verdient gemacht. Wenn sich seine mechanische Vulkantheorie, die er mit großem Scharfsinn in seinem Werk Volcanic energy: an attemp to develop its true origin and cosmical relations (Phil. Trans. Royal Society 1873 Bd. 103. Deutsch von A. v. Lasaulx Verhandlungen des naturhistorischen Vereins für Rheinland und Westfalen, Bonn 1875) klargelegt hat, auch als unhaltbar erwiesen hat, so sind doch verschiedene Ideen, wie die des sich kontrahierenden Erdkörpers und des sich dabei bildenden Tangentialdrucks, der die Gebirgsketten heraushob, von außerordentlich fruchtbarer Wirkung gewesen. Von Bedeutung in der Erdbebenforschung ist sein Buch The great Neapolitan earthquake of 1857 (London 1862), das besonders auf die Methode der Forschung einen bestimmenden Einfluß ausgeübt hat. Mit J. W. Mallet gab er weiter eine Zusammenstellung der Erdbeben in der Zeit von 1606 bis 1858 heraus.

Literatur. *Dictionary of National Biography Bd. 35, S. 429, London 1893.*

O. Marschall.

Malpighi

Marcello.

Geboren am 10. März 1628 zu Crevalcore bei Bologna; gestorben am 29. November 1694 in Rom. Studierte in Bologna Medizin und wurde dort Professor der Arzneikunde. 1657 ging er nach Pisa, kehrte aber schon nach drei Jahren nach Bologna zurück. Auch in Messina, wohin er 1662 einen Ruf bekam, blieb er nicht sehr lange, da er Streitigkeiten mit den Galenisten und Arabern bekam; 1691 berief ihn Papst Innocenz XI. nach Rom als seinen Arzt und Kammerherrn. Malpighi ist als der Schöpfer der mikroskopischen Anatomie anzusehen. Er war der erste, der sich stark konvexer Glaslinsen, sogenannte Mikroskope, zur Erforschung der feinen Struktur der Organe bediente. Zum Teil legte er seine ersten Beobachtungen in zwei Briefen an seinen Freund Alfonso Borelli nieder (1661). Er machte sehr genaue Beobachtungen über das Gehirn, die Netzhaut, die Tastorgane, den Bau der Nieren, Eingeweide, Nerven usw. Außerdem studierte er den Seidenwurm und die Bildung des Hühnchens im Ei. Auch verdanken wir ihm zahlreiche scharfe und wichtige Beobachtungen über die Anatomie der Pflanzen. Mehrere seiner Entdeckungen lassen seinen Namen noch heute fortleben, so die Malpighischen Körperchen der Milz, das Rete Malpighii der Haut, die Malpighischen Gefäße der Insekten usw. Von seinen Werken seien angeführt: Anatomia plantarum, London 1675 bis 1679. Deutsch von Möbius in Ostwalds Klassik. Nr. 120, Leipzig 1901; Opera omnia, London 1686, 2 Bde; Opera posthuma, 1697 Opera medica et anatomica varia, Venedig 1734.

Literatur. *Atti Notizie della vita e delle opere di Malpighi di Bellini, Bologne 1847.* — ***Haustein,*** *Ueber die Begründung der Pflanzenanatomie durch Nehemia Grew und Marcell Malpighi, Bonn 1886.*

W. Harms.

Malus

Etienne Louis.

Geboren am 23. Juli 1775 in Paris; gestorben daselbst am 23. Februar 1812. Er studierte an der polytechnischen Schule, wurde 1796 Capitain des Geniekorps. Während der Expedition nach Aegypten von der Pest befallen, kehrte er 1801 nach Frankreich zurück, war 1806—1808 Unterdirektor der Fortifikation von Straßburg, wurde 1809 zum Examinator der polytechnischen Schule in Paris ernannt. Sein Arbeitsgebiet ist die Optik, er ist der Entdecker der Polarisation des Lichts und berechnete ihre Gesetze.

Literatur. ***Delambre,*** *Notice sur M. dans les Mémoires de l'Institut sc. math. 1812, Bd. 13, S. 27.* — ***Arago,*** *Oeuvres biographiques Bd. 3, S. 113.*

E. Drude.

Mammalia.

Die durch Haarbekleidung, Entwickelung der Jungen im Körperinnern und den Besitz von Milchdrüsen ausgezeichnete, höchstentwickelte Abteilung der Wirbeltiere, welche im Artikel „Säugetiere“ behandelt wird.

Mandelsteine.

So nennt man vulkanische Gesteine, die mit ausgefüllten (Kalkspat, Achat usw.) Blasenräumen (Mandeln wegen der Gestalt) durchsetzt sind (vgl. den Artikel „Gesteinsstruktur“).

Manometer.

1. Allgemeines. 2. Manometer für absolute Druckmessung: a) für kleine. b) für hohe Drucke. 3. Manometer für besondere wissenschaftliche Zwecke. 4. Technische Manometer. 5. Manometer zur Messung von dynamischem Druck.

1. Allgemeines. Manometer dienen zur Messung des statischen Druckes von Gasen, Dämpfen und Flüssigkeiten, d. h. der Kraft, die von ihnen im Zustand der Ruhe auf die Flächeneinheit einer ebenen Platte in senkrechter Richtung ausgeübt wird. Manche Arten von Manometern, die Differentialmanometer, sind nur zur Messung von Differenzen solcher Drucke eingerichtet. Um den Druck selbst messen zu können, ist es im allgemeinen notwendig, daß in einem Teile des Manometers Gegendruck nicht herrscht, daß also aus diesem Teil die vorhandenen Gase, Dämpfe usw. entfernt werden.

Bei dem verbreitetsten Manometer, dem Luftdruckmesser oder Barometer (vgl. den Artikel „Barometer“) und bei vielen ähnlich konstruierten Manometern für andere Drucke als den Atmosphärendruck geschieht dies durch Umkehren eines unten geschlossenen und mit Quecksilber gefüllten Rohres von genügender Länge. Das Quecksilber löst sich dabei am geschlossenen Ende von der Wandung los und sinkt so weit, bis der auf das offene (in Quecksilber tauchende oder U-förmig umgebogene) Ende wirkende zu messende Druck dem Gewichte der Quecksilbersäule das Gleichgewicht hält. Das vom flüssigen Quecksilber entleerte Rohrstück am geschlossenen Ende des Rohres ist dann allerdings noch mit Quecksilberdampf angefüllt; derselbe übt jedoch bei Zimmertemperatur nur einen Druck aus, der einer Quecksilbersäule von 0,001 mm Höhe entspricht. Bei anderen Manometern erfolgt die Herstellung der „Barometerleere“ durch Evakuieren mittels Luftpumpen.

In vielen Fällen, insbesondere für technische Zwecke genügt es, den Ueberdruck über den Atmosphärendruck zu messen. Instrumente für Drucke unter 1 Atmosphäre

werden häufig als Vakuummeter bezeichnet.

Als Maßeinheit, in welcher der Druck gemessen wird, diente früher und häufig auch noch jetzt die Atmosphäre, d. h. der Druck einer Quecksilbersäule von 76 cm Höhe und 0 ° C unter der Schwere von 45 ° geogr. Breite. Sie entspricht einem Druck von 13,596 · 76 = 1033,3 gr-Gew./cm² (13,596 = spezifisches Gewicht des Quecksilbers). In absolutem Maß ist eine Atmosphäre = g · 1033,3 Dyne / cm², wenn mit g die Beschleunigung der Schwere bezeichnet wird, die bei Druckmessungen in 45 ° geogr. Breite zu 980,66 angenommen wird. Häufig bezeichnet man die Größe des Druckes in der Weise, daß man die Höhe der Quecksilbersäule von 0 ° angibt, die dem Drucke das Gleichgewicht halten würde. Neuerdings ist an Stelle der Atmosphäre vielfach, besonders in der Technik, die Einheit kg/cm² getreten. Es ist 1 Atm. = 1,033 kg-Gew./cm².

2. Manometer für absolute Druckmessung. Bei Manometern für wissenschaftliche Zwecke ist in der Regel ein Haupterfordernis, daß sie ohne empirische Eichung den absoluten Wert des Druckes zu messen gestatten. Eine große Zahl von Manometern für kleine, mittlere und hohe Drucke benutzen zur Erreichung dieses Zieles die Druckhöhe von Flüssigkeiten (meist Quecksilber oder Wasser).

Hierbei ist auf die Temperatur der Flüssigkeit Rücksicht zu nehmen. Eine bei der Temperatur t gemessene Quecksilberdruckhöhe h wird auf die Temperatur t′ reduziert durch Multiplikation mit dem Faktor 1 + 0.000 182 (t′—t).

Bei anderen Manometern wird das Mariotte sche Gesetz benutzt, nach dem das Produkt aus Volumen und Druck eines Gases bei konstanter Temperatur eine Konstante ist, was insbesondere bei verdünnten Gasen sehr genau zutrifft. Bei Manometern für hohe Drucke kommt hauptsächlich das Prinzip der Wage zur Verwendung.

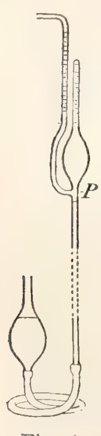
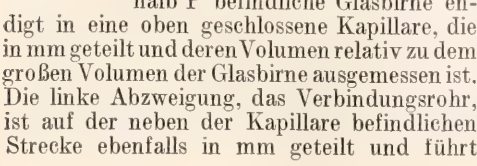


Fig. 1.

2a) Manometer für kleine Drucke. Das Mc Leod sche Manometer (Fig. 1), bei dem das Mariotte sche Gesetz benutzt wird, ist für sehr kleine Drucke bestimmt. Es besteht aus einem Glasrohr, das sich bei P verzweigt und in welchem Quecksilber durch Heben eines mit ihm kommunizierenden Quecksilbergefäßes zum Steigen gebracht werden kann. Die oberhalb P befindliche Glasbirne endigt in eine oben geschlossene Kapillare, die in mm geteilt und deren Volumen relativ zu dem großen Volumen der Glasbirne ausgemessen ist. Die linke Abzweigung, das Verbindungsrohr, ist auf der neben der Kapillare befindlichen Strecke ebenfalls in mm geteilt und führt



zu dem Raum, in dem der zu messende Druck herrscht. Beim Heben des Quecksilbers über P hinaus werden die in der Birne abgeschlossenen Gasreste unter Kompression in das Kapillarrohr hineingetrieben. Der Höhenunterschied des Quecksilberstandes im Kapillarrohr und im Verbindungsrohr multipliziert mit dem Verhältnis des im Kapillarrohr übriggebliebenen Gasvolumens zum Volumen der Birne gibt direkt den zu messenden Druck in mm Quecksilbersäule. Die Angabe des Mc Leod schen Manometers ist, äusserste Trockenheit des Systems vorausgesetzt, selbst bei dem sehr kleinen Druck von 0,001 mm Quecksilber noch bis auf wenige Prozente richtig, wie eine von Scheel und Heuse vorgenommene Vergleichung mit einem von ihnen konstruierten, noch empfindlicheren Manometer zeigte, bei dem die Druckunterschiede aus der Durchbiegung einer Kupfermembran von etwa 25 cm Durchmesser und 0,03 mm Dicke bestimmt wurden.

Ein Manometer für sehr kleine Drucke, bei dem auch der Druck des gesättigten Quecksilberdampfes, der unabhängig von dem Volumen nur durch die Temperatur gegeben ist (bei 20° 0,0011 mm Quecksilberhöhe), mitgemessen wird, ist das absolute Manometer von M. Knudsen. Bei demselben wird die mechanische Kraft, mit der das zwischen zwei ungleich warmen Platten von der absoluten Temperatur T_1 und T_2 befindliche und sie umgebende Gas abstoßend auf die Platten wirkt, gemessen. Zwischen der Kraft K, die pro Flächeneinheit wirkt, und dem Druck p des Gases besteht bei kleinen Werten von p (bis zu einigen Tausendstel mm) und von T_1—T_2 die Beziehung

$$p = 4K \frac{T_2}{T_1 - T_2} \text{ Dyn/cm}^2.$$

Der Abstand der Platten muß im Vergleich zu der mittleren Weglänge der Molekel sehr klein sein. Die eine Platte ist fest, die andere beweglich als Arm einer Drehwage angebracht, mittels derer die Kraft gemessen wird.

Für die Messung von Drucken zwischen 0,01 und 5 mm Quecksilbersäule ist das Rayleigh sche Manometer (Fig. 2) in vervollkommneter Ausführung (Scheel und Heuse) mit einer Genauigkeit von 0,0005 mm anwendbar. Zwei kommunizierende Druckkammern von etwa 25 mm Weite sind bis zu zwei Glasspitzen mit Quecksilber gefüllt, dessen Stand mit Hilfe einer an einem Verbindungsschlauch angebrachten Klemmschraube genau einreguliert werden kann. Ist zwischen den beiden Kammern ein Druckunterschied vorhanden, so kann durch eine Neigung des Manometers, die durch Einschaltung von federnden Glasröhren

ermöglicht wird, wieder auf Berührung beider Glasspitzen eingestellt werden. Aus der Neigung des Systems, die mit Hilfe eines mit ihm verbundenen Spiegels und einer vertikalen Skale mit Fernrohrablesung bestimmt wird, kann man bei Kenntnis der Spitzenentfernung die Niveauänderung berechnen. Bei etwas geringeren Genauigkeitsansprüchen ist das ältere Thiesensche Manometer (Fig. 3) sehr bequem, dessen

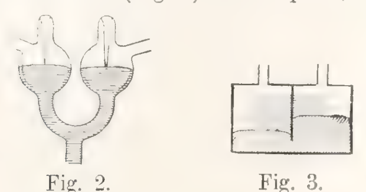


Fig. 2. Fig. 3.

Genauigkeit zu 0,001 mm angegeben wird. Es besteht aus zwei weiten, unten kommunizierenden zylindrischen Kammern, welche vorn und hinten mit Glasplatten verschlossen sind. Die Hinterwand besitzt eine durchgehende Teilung mit horizontalen Strichen. Der Quecksilberstand in beiden Kammern wird mittels Mikroskops aus dem Abstand zwischen direkt gesehenen Teilstrichen und ihren Spiegelbildern hergeleitet, wobei die großen Oberflächen in der Mitte als eben angesehen werden können. — Drucke bis 30 mm Quecksilbersäule mit einer Genauigkeit von 0,002 mm zu messen gestattet ein von Scheel und Heuse angegebenes Manometer. Es besitzt einen festen Schenkel und einen mit diesem durch eine lange Glasfeder kommunizierenden in vertikaler Richtung verstellbaren Schenkel. Die Einstellung erfolgt wie bei dem Rayleighschen Manometer auf Berührung eingeschmolzener Glasspitzen mit ihren Spiegelbildern in den Quecksilberkuppen der Manometerschenkel. Die Glasspitzen sind nach oben verlängert und tragen ein Tischchen mit aufgesetztem Spiegel, aus dessen Neigung der Höhenunterschied der Glasspitzen mittels Skale und Fernrohr bestimmt wird. Größere Höhenunterschiede werden durch zwischengelegte planparallele Glasplatten von bekannter Dicke ausgeglichen. — Bei Quecksilbermanometern zur Messung von Drucken über 30 mm Quecksilberhöhe genügt in der Regel die Ablesung des Quecksilberstandes mit Hilfe von Visieren, welche die Glasröhren oberhalb der beiden Kuppen ringförmig umgeben; es wird darauf eingestellt, daß ein Lichtblitz zwischen Visier und Kuppe eben gerade durchtritt. Der Abstand der Visiere kann an einer Skale, eventuell mit Hilfe eines Nonius, abgelesen werden. Ein besonders gut konstruiertes Manometer für Drucke bis 100 mm Quecksilbersäule, welches außerdem heizbar ist, wurde von Scheel und Heuse angegeben. Meßgenauigkeit ± 0,005 mm. An Stelle der Visiere wird häufig eine hinter den Kuppen angebrachte spiegelnde Skale benutzt, wobei beim Ablesen die Kuppe und ihr Spiegelbild zur Deckung zu bringen sind. Auch kann man die Quecksilberhöhe mittels eines Kathetometers ermitteln.

2b) Manometer für hohe Drucke. Bei der Messung von hohen Drucken kann wie beim Mc Leodschen Manometer das Mariottesche Gesetz benutzt werden, indem aus der Volumkompression eines abgeschlossenen Gasvolumens auf den Druck geschlossen wird. Jedoch nimmt dabei die Empfindlichkeit der Messung dem Drucke proportional ab; auch müssen für große Drucke die Abweichungen des Gases vom Mariotteschen Gesetz bekannt sein.

Die direkte Messung mit einer Quecksilbersäule, die weiter in Betracht kommt, bietet wegen der Höhe derselben Schwierigkeiten. Doch sind Manometer nach diesem Prinzip für Drucke bis zu 420 Atm. (Cailletet Eiffelturm in Paris) gebaut worden. Ein solches Manometer für Drucke bis 12 m Quecksilbersäule befindet sich in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt. Das hohe Steigrohr besitzt von 2 zu 2 m mit Hähnen versehene Anstiche, an deren jeden sich ein 2 m langes Glasrohr ansetzt, so daß sämtliche Drucke bis zu 12 m Quecksilbersäule gemessen werden können. Die Temperaturbestimmung an der Quecksilbersäule erfolgt nicht wie gewöhnlich mit frei aufgehängten Quecksilberthermometern, sondern mit Hilfe eines am Steigrohr befestigten, als Widerstandsthermometer benutzten Nickeldrahtes (Holborn und Henning), wodurch die mittlere Temperatur der Säule bis auf 0,1° C sicher bestimmt werden kann. Ein Quecksilberhochdruckmanometer einfacherer Konstruktion für Drucke bis 25 m Quecksilbersäule, welches jedoch nur zur Ablesung von vier bestimmten Drucken eingerichtet ist, benutzten P. P. Koch und E. Wagner.

Die Unbequemlichkeiten der hohen Quecksilbersäulen sind vermieden bei den sogenannten gebrochenen oder verkürzten Quecksilbermanometern, bei denen der zu messende Druck durch mehrere hintereinander geschaltete kürzere Manometer in eine Reihe von Teildrucken zerlegt wird. Die Uebertragung des Druckes von einem Manometer auf das folgende muß dabei durch eine Flüssigkeit von kleinerem spezifischen Gewicht als Quecksilber erfolgen, wozu Oel (Pérot), Gas (Kamerlingh Onnes), in der Regel aber Wasser verwendet wird. Für die Prüfzwecke der Reichsanstalt ist ein Manometer für Drucke bis 20 kg/cm² gebaut worden, bei dem nach einem von Thiesen

angegebenen Prinzip sämtliche Rohre aus Glas bestehen und alle Einzelhöhen (Quecksilber- und gegenwirkende Wasserhöhen) einzeln abgelesen werden können. Die Meßgenauigkeit mit diesem Instrument beträgt nach den Untersuchungen von Wiebe bei 20 kg/cm² etwa 0,01 kg. Das Manometer mit Gasübertragung von Kamerlingh Onnes ist für Drucke bis 100 Atm. eingerichtet.

Für noch höhere Drucke sind indessen gebrochene Quecksilbermanometer noch nicht verwendet worden. Man greift dann zur Reduktion des Druckes nach dem umgekehrten Prinzip der hydraulischen Presse oder zu den Wagemanometern, bei denen der Druck, der auf einen Kolben von bekanntem Querschnitt wirkt, durch Gewichte bestimmt wird. Nach dem ersten Prinzip ist das Amagatsche Manometer gebaut. Der große zu messende Druck wirkt auf einen Kolben k vom Querschnitt q, der die Kraft auf einen Kolben K vom Querschnitt Q überträgt. In der Flüssigkeit, auf welche der Kolben K drückt, herrscht ein im Verhältnis q : Q verringerter Druck, der mit Hilfe einer nicht zu hohen Quecksilbersäule abgelesen werden kann.

Die Hauptschwierigkeit der Messung besteht in der Bestimmung des Reduktionsfaktors q: Q. Am genauesten wird derselbe nach E. Wagner und P. P. Koch durch direkte Vergleichung mit einer hohen Quecksilbersäule ermittelt. Benutzt man den so erhaltenen Wert von q :Q auch für höhere Drucke, so ist zu bedenken, daß unter dem Einfluß derselben eine Weitung des Zylinders auftritt. Die Berücksichtigung der Deformation, die von Klein näher untersucht ist, wird besonders kompliziert dadurch, daß der Kolben beim Amagatschen Manometer nicht mit Stulpdichtung versehen, sondern einfach mit möglichst geringem Spielraum in den Zylinder eingesetzt ist, so daß die Dichtung nur durch das tropfenweise austretende Schmiermittel bewirkt wird. Zur Verringerung der Reibung müssen übrigens die Kolben während der Beobachtung in Rotation erhalten werden.

Die Wagemanometer werden teils ohne, teils mit Druckreduktion ausgeführt, und ihre Kolben sind teils nach Art des Amagatschen Kolbens ausgeführt, teils mit Stulpdichtung versehen. Wagen, bei denen keine Reduktion des wirksamen Druckes eintritt, sind z. B. das von Holborn und Baumann benutzte Manometer für Drucke bis 250 kg/cm² und die sogenannten Manometer-Probierapparate. Die Stückrathsche Druckwage, die z. B. in der Reichsanstalt für die Prüfzwecke verwendet wird, ist eine ungleicharmige Hebelwage, auf deren am kürzeren Hebel befindliches Gehänge der unter dem Flüssigkeitsdrucke stehende Kolben drückt, während am längeren Hebel ein Gehänge zur Aufnahme von Gewichten vorhanden ist. Das Hebelverhältnis ist 1:10. Bei kleineren Drucken als 40 kg müssen auch am kürzeren Hebelarm Schale und Gewichte angebracht werden. Die Dichtung erfolgt mittels einer am Kolben angebrachten Manschette. Der maßgebende Querschnitt ist daher derjenige des Zylinders. Um die Reibung aufzuheben, wird der Stempel mittels besonderer mechanischer Einrichtungen in Rotation oder besser noch in Schwingungen versetzt. Nach Untersuchungen von Wiebe, bei denen auch die von Meißner bestimmte Dehnung des Hohlcylinders berücksichtigt ist, beträgt die Genauigkeit in der Bestimmung des absoluten Druckes mit der Stückrathschen Druckwage auch bei dem Druck von 500 kg/cm² mindestens $^1/_{2000}$. — Bei der Druckwage von Schäffer und Budenberg kommt ein in Figur 4

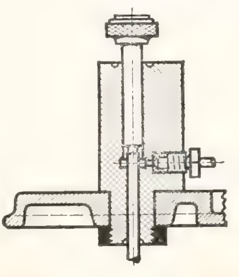


Fig. 4.

dargestellter Differentialkolben zur Verwendung, bei dem die Dichtung wie beim Amagatschen Kolben erfolgt. Das Druckmittel tritt an der seitlichen Verschraubung ein. Für die Druckwirkung nach außen kommt nur die Differenz der Querschnitte der beiden Kolben in Betracht. Am unteren dünnen Ende hängen die Gewichte. Um die Reibung aufzuheben, wird der Kolben mitsamt den Gewichten in Rotation versetzt. Mit einer solchen Wage lassen sich Drucke bis zu 1500 kg/cm² bequem messen.

Schaltet man zwei solche Manometer hintereinander, indem man den abgewogenen, künstlich erzeugten Druck der 1. Wage auf die obere Fläche des Kolbens der 2. Wage wirken läßt, so kann man den Meßbereich je nach den Querschnittsverhältnissen bedeutend erweitern (bis zu 5000 kg/cm²), ohne die Differenz der beiden Kolbenflächen zu klein machen zu müssen.

Die Wage von Stanton im National Physical Laboratory ist ebenfalls eine Differentialkolbenpresse, jedoch mit 2 einzelnen Kolben. Die Wage ist für Drucke bis 1260 kg/cm² benutzt worden. — Eine Wage, die der von Schäffer und Budenberg ähnlich ist, jedoch Stulpdichtung besitzt, ist von Martens angegeben, und zwar sind bei derselben die Stulpe am Zylinder befestigt. Zu erwähnen ist ferner die Konstruktion von P. W. Bridgman, bei der der Zylinder auch von außen dem Druck

ausgesetzt wird, um die Ausweitung zu vermeiden. Es soll mit der Wage eine Genauigkeit von 0,1 % bis 6800 kg/cm² erreicht worden sein. Statt des Kolbens benutzt Martens für Drucke bis 400 kg/cm² und bei geringeren Genauigkeitsansprüchen (0,5 %) die „Meßdose".

Ein Manometer, das noch höhere Drucke als die Wagemanometer zu messen gestattet, ist das Lisellsche Manometer, welches indessen nur insofern eine absolute Messung des Druckes gestattet, als es eine sichere Extrapolation über den Bereich seiner Eichung zuläßt. Das Prinzip desselben ist folgendes: Ein Metalldraht ändert seinen Widerstand in einer unter hohen Druck gesetzten Flüssigkeit, und zwar nicht nur sein Volumen, sondern auch den spezifischen Widerstand. Wählt man ein Material, dessen Widerstand möglichst wenig von der Temperatur abhängig ist, die ja bei der Druckerhöhung ansteigt, so besteht schon kurze Zeit nach der Kompression zwischen Widerstand und Druck eine eindeutige Beziehung, die bei Manganin nahezu linear ist. Wegen der Kleinheit der Widerstandsänderungen sind außerordentlich genaue Widerstandsmessungen notwendig, weswegen der Apparat praktische Anwendung noch nicht gefunden hat und Bedeutung wohl nur für die Messung ganz hoher Drucke gewinnen wird. Ein elektrisches Verfahren anderer Art wurde von Lindeck untersucht: Ein nicht zu kurzer Messing- oder für höhere Drucke Stahlzylinder, der an beiden Seiten verschlossen und mit der Druckflüssigkeit gefüllt ist, trägt außen in der Mitte einige Windungen Manganindraht. Dehnt sich der Zylinder unter der Einwirkung des Druckes, so wächst zufolge der Verlängerung des Drahtes dessen Widerstand, und diese Widerstandsänderungen sind reversibel. Aber auch diese Methode gibt keine größere Genauigkeit als die Wagemanometer und erfordert sehr genaue Widerstandsmessungen.

3. Manometer für besondere wissenschaftliche Zwecke. Handelt es sich darum, Druckänderungen leicht sichtbar zu machen, ohne daß es auf ihren genauen absoluten Betrag wesentlich ankommt, so können an Stelle der vorstehend behandelten Manometer zweckmäßigerweise andersartige Instrumente treten.

Bei kleinen Drucken ist in dieser Hinsicht die Toeplersche Drucklibelle zu nennen. Dieselbe besteht aus einem unter stumpfem Winkel umgebogenen Kapillarrohr, in dem ein Flüssigkeitsfaden verschiebbar ist; das eine Ende wird mit dem Raum, in dem der zu messende Druck herrscht, verbunden, während auf das andere Ende der konstante Vergleichsdruck wirkt. In verbesserter Ausführung ist das Instrument von Toepler zur Beobachtung von kurzdauernden Luftdruckschwankungen (Windwogen) benutzt und für photographische Registrierung eingerichtet worden. Eine gesteigerte Ablesegenauigkeit besitzen auch die Instrumente mit zwei verschiedenen Füllungen von nahezu gleichem Gewicht, bei denen die Menisken sich in erweiterten Rohrstücken befinden und daher bei Druckänderungen die Trennungsfläche der beiden Flüssigkeiten einen vielfachen Weg von dem der Menisken zurücklegt. — Eine bequeme Registrierung gestatten die elektrischen Manometer nach Voege und nach Pirani. Bei ersterem ist ein Hitzdraht und ein Thermoelement zur Temperaturmessung des Hitzdrahtes in eine Glasbirne eingeschmolzen. Bei konstantem Strom im Hitzdraht ist die elektromotorische Kraft des Thermoelements ein Maß für die Luftverdünnung, da von der letzteren die Wärmeableitung und daher die Temperatur des Hitzdrahtes und des Thermoelementes abhängt. Aehnlich bei dem Piranischen Instrument, wo die Widerstandsänderung eines in eine Glasbirne eingeschmolzenen Platindrahtes bei Stromdurchgang mittels Wheatstonescher Brücke und Galvanometerausschlag gemessen wird.

4. Technische Manometer. In der Technik sind am verbreitetsten diejenigen Manometer, bei denen die elastische Deformation von Platten oder gebogenen Röhren (Bourdonfedern) als ein Maß für die Größe des wirksamen Druckes benutzt wird. Sie bedürfen sämtlich einer Eichung, und ihre Anzeigen sind zufolge der elastischen Nachwirkung bei steigendem Druck etwas anders als bei fallendem Druck. Die Instrumente mit Plattenfedern weisen außerdem leicht größere dauernde Abweichungen auf. Die Anordnung ist bei ihnen folgende: Auf die meist aus Stahl hergestellte Platte wirkt von unten her der zu messende Druck. Die Bewegung des Plattenmittelpunktes wird auf ein Zeigerwerk übertragen. Bei den Manometern mit Bourdonfedern (Fig. 5) tritt an

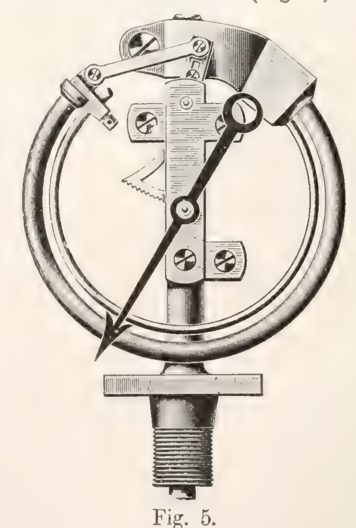


Fig. 5.

die Stelle der Platte eine kreisförmig gebogene dünnwandige Röhre von elliptischem oder kreisförmigem Querschnitt, die aus einer besonderen Metallegierung mit möglichst geringer elastischer Nachwirkung oder für höhere Drucke (über 100 kg/cm²) aus Stahl

hergestellt ist. Das eine Ende der Röhrenfeder ist fest mit einem starkwandigen Rohr verbunden, durch welches das Druckmittel in das Innere der Feder eingeführt wird. Die Bewegung des anderen, geschlossenen Endes wird wiederum auf ein Zeigerwerk übertragen. Bei besonders feinen Messungen kann man an Stelle des Zeigerwerkes eine Spiegelablesung benutzen (Spiegelmanometer von Martens). Eine von Dreyer, Rosenkranz und Droop (Hannover) benutzte Modifikation der Röhrenfeder besteht darin, daß konzentrisch zu ihr ein Stahldraht angebracht ist (Fig. 5), der die Spannkraft des Rohres verstärkt. Wichtig ist bei allen Federmanometern, daß die Federn keinen zu hohen Temperaturen ausgesetzt werden. Bei Dampfmanometern muß deshalb ein mit Wasser gefülltes Knierohr vor das Manometer geschaltet oder die Stelle der Feder, an welcher das Druckmittel zutritt, zu oberst gelegt werden (Fig. 5), so daß die Füllflüssigkeit nicht wieder ablaufen kann (Dreyer, Rosenkranz und Droop).

Ueber die Genauigkeit, welche mit Federmanometern zu erreichen ist, sei folgendes erwähnt:

Nach Untersuchungen von E. Wagner war die absolute Anzeige eines Magdeburger Federmanometers auf ± 0,08 Atm. konstant. Die Nachwirkung verlief so gleichmäßig, daß sie bei der Benutzung des Manometers in Rechnung gesetzt werden kann. Nach den Untersuchungen von Klein ist die Genauigkeit der Bourdonfedern höchstens 3 Promille. Aus den zahlreichen, in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt vorgenommenen Prüfungen folgt, daß man als Nachwirkungsbreite, d. h. als Unterschied der Anzeige beim Steigen und beim Fallen nach längerem Verweilen auf höherem Druck, im Maximum zulassen muß: Bei Drucken bis 20 kg/cm² etwa 0,1 kg, bis 50 kg/cm² 0,2 kg, bis 100 kg/cm² 0,5 kg, bis 500 kg/cm² etwa 2,5 kg. Die Abweichungen der absoluten Anzeige sind selbst bei den der Reichsanstalt von den Fabrikanten zur Prüfung eingereichten Manometern recht beträchtlich. Bei Kontrollmanometern bis 20 kg/cm², die zur Kontrolle von Betriebsmanometern dienen sollen, waren die Abweichungen im Mittel 0,08 kg/cm², bei gewöhnlichen Manometern bis 20 kg/cm² im Mittel 0,15 kg, bis 100 kg/cm² 0,8 kg, bis 500 kg/cm² 3,0 kg. Bezüglich des Temperatureinflusses fand Wiebe, daß eine Temperaturerhöhung von 1° eine Erhöhung der Angabe des Manometers um 0,005 kg bei 10 kg/cm² und um 0,02 kg bei 100 kg/cm² Druck hervorruft.

Ueber technische Manometer für besondere Zwecke kann nur folgendes Erwähnung finden.

Zur Messung von Ueber- oder Unterdrucken bei Schornsteinen und dergleichen dienen häufig Manometer, bei denen die Bewegung einer in ein Flüssigkeitsbad (Glyzerin) eintauchenden Glocke auf ein Zeigerwerk übertragen wird. Der innere Luftraum der Glocke steht mit dem Raum, dessen Druck gemessen werden soll, in Verbindung, auf der äußeren Wandung lastet der Atmosphärendruck. Bei der manometrischen Wage in der Modell-Versuchsanstalt für Luftschiffahrt und Flugtechnik in Göttingen sind zwei solche Glocken vorhanden, um Druckunterschiede messen zu können.

Bei den pneumatischen Flüssigkeitsstandmessern wird auf den Boden des Gefäßes, dessen Tiefe bestimmt werden soll, eine kleine Taucherglocke mit anschließender Rohrleitung versenkt, die zu einem Bourdonschen Manometer führt. Bei den besseren Konstruktionen ist eine Vorrichtung vorhanden, um Luft in das Gefäß mittels einer kleinen Pumpe nachdrücken zu können, da die Luft vom Wasser allmählich absorbiert wird. Auf demselben Prinzip beruht das Gezeitenmanometer von K. Honda. Nur ist bei ihm das Röhrenfedermanometer durch ein zweischenkliges Quecksilbermanometer mit Schwimmer und Registrierung ersetzt. Hierbei ist die Anordnung so getroffen, daß die Höhenunterschiede des Meeresspiegels (bis 10 m) auf 0,6% reduziert werden. Zur Bestimmung der Meerestiefe werden versenkbare Röhrenfedermanometer benutzt. Die konstruktive Ausführung, welche die Sicherung des Apparates gegen vielfache Störungen gewährleisten muß, bereitet hierbei erhebliche Schwierigkeiten, denen besonders die Mensingsche Konstruktion begegnet.

5. Manometer zur Messung von dynamischem Druck. Zur Messung der Strömungsgeschwindigkeiten von Flüssigkeiten, Gasen und Dämpfen können Manometer verwendet werden, die den dynamischen Druck des strömenden Mediums messen, wie die Pitotsche Röhre und die Recknagelsche Stauscheibe. Näheres über diese und verwandte Instrumente, die gemäß Abschnitt 1 nicht mehr als Manometer im engeren Sinne zu bezeichnen sind, siehe in den Artikeln „Flüssigkeitsbewegungen" und „Gasbewegungen".

Literatur. ***K. Scheel und W. Heuse**, Ueber die Messung kleiner Drucke. Verhandlungen der Deutschen Physik. Gesellsch.* ***11**, S. 1, 1909. — **Dieselben**, Ueber einen Apparat zur Messung sehr kleiner Drucke. Zeitschr. f. Instrumentenkunde **29**, S. 14, 1909. — **Dieselben**, Zwei Quecksilbermanometer für niedrige Drucke. Zeitschr. f. Instrumentenkunde **29**, S. 344, 1909. **Dieselben**, Ein heizbares Quecksilbermanometer für Drucke bis 100 mm. Zeitschr. f. Instrumentenkunde **30**, S. 45, 1910. — **M. Knudsen**, Ein absolutes Manometer. Ann. d. Physik (4) **32**, S 809, 1910. — **H. F. Wiebe**, Apparate zur Messung höherer Drucke. Zeitschr. für komprimierte und flüssige Gase, 1897, Nr. 1, 2, 5, 6. — **Holborn und Henning**, Ueber das Platinthermometer und den Sättigungsdruck des Wasserdampfes zwischen 50 und 200°. Annal. d. Physik (4)* ***26**, S. 833, 1908. — **P. P. Koch und E. Wagner**, Ueber absolute Messung hoher Drucke mit dem Amagatschen Manometer. Ann. d. Physik (4)* ***31**, S. 31, 1910. — **Holborn und Baumann**, Ueber den Sättigungsdruck des Wasserdampfes oberhalb 200°. Annal. d. Physik (4)* ***31**, S. 945,*

*1910. — **W. Meissner,** Ueber den Einfluß der elastischen Dehnung des Hohlzylinders auf die Angaben der Stückrathschen Druckwage. Zeitschr. f. Instrumentenkunde **30**, S. 137, 1910. — **H. F. Wiebe,** Ueber die Genauigkeit der Druckmessung mit der Stückrathschen Druckwage. Zeitschr. f. Instrumentenkunde, **30**, S. 206, 1910. — **Stanton,** Messung hoher Drucke. Engineering **75**, S. 31, 1903, und Zeitschr. für Instrumentenkunde **23**, S. 252, 1903. — **G. Klein,** Untersuchung und Kritik von Hochdruckmessern. Inaug.-Dissertation Techn. Hochschule Berlin 1908. — **A. Martens,** Apparate zur Messung hoher Flüssigkeitsdrücke. Zeitschr. d. Vereins Deutsch. Ingenieure **53**, S. 747, 1909. — **P. W. Bridgman,** An Absolute Gauge for Measuring High Hydrostatic Pressures. Physical Review **28**, S. 145, 1909. — **E. Lisell,** Ueber eine neue Methode, hohe Drucke zu messen. Oefersight af Kongl. Vetenshaps-Akademiens Förhandlingar 1898, Nr. 9, Stockholm. — **Derselbe,** Inaugural-Dissertation, Upsala 1902. — **Lindeck,** Tätigkeitsbericht der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt, Zeitschr. f. Instrumentenkunde **30**, S. 154, 1910. — **M. Toepler,** Ueber Beobachtungen von kurz dauernden Luftdruckschwankungen (Windwogen). Annal. d. Physik **12**, S. 787, 1903. — **A. P. Chattock, W. E. Walker** und **E. H. Dixon,** Empfindliches Manometer. Philosophical Magazine **1**, S. 96, 1901. — **W. Voege,** Ein neues Vakuummeter. Physikalische Zeitschr. **7**, S. 498, 1906. — **M. v. Pirani,** Selbstzeigendes Vakuummeßinstrument. Verhdl. d. Deutsch. Physikal. Gesellsch. **8**, S. 686, 1906. — **E. Wagner,** Metallmanometer als Hochdruck-Präzisionsmesser, geprüft mit dem Amagatschen Manometer. Inaug.-Dissertation, München 1903. Annal. d. Physik (4), **15**, S. 906, 1904. — **P. H. Rosenkranz,** Neuerungen an Federmanometern usw. Zeitschr. d. Vereins Deutsch. Ingenieure **46**, S. 1003, 1902. — **Maercks,** Feuerungskontrolle u. Dampfkesseluntersuchung. Zeitschr. des Vereins Deutscher Ingenieure **53**, S. 124, 1909. — **Prandtl,** Die Bedeutung von Modellversuchen für die Luftschiffahrt und Flugtechnik. Zeitsch. d. Vereins Deutsch. Ing. **53**, S. 1715, 1909. — **K. Honda,** Ein tragbares Gezeiten-Manometer. Zeitschr. f. Instrumentenkunde **26**, S. 90, 1906.*

W. Meissner.

Manteltiere.

Tunicaten, die durch den Besitz eines cellulosehaltigen Mantels (Tunica), eines Kiemenkorbs und einer Chorda dorsalis, im Jugendzustand ausgezeichnete Abteilung des Tierreichs, welche in dem Artikel „Tunicata“ behandelt wird.

Marchand

Richard Felix.

Geboren am 25. August 1813 zu Berlin, 1840 Privatdozent an der Universität Berlin, seit 1843 Professor in Halle, starb daselbst am 2. August 1850 an der Cholera. Marchand hat auf anorganischem und organischem Gebiete sich vielseitig betätigt. Bemerkenswert sind seine gemeinschaftlich mit O. L. Erdmann ausgeführten Atomgewichtsbestimmungen für eine Reihe wichtiger Elemente (1841 bis 1850). Marchand schrieb außer einem Grundriß der organischen Chemie ein Lehrbuch der physiologischen Chemie (1844).

E. von Meyer.

Marci de Kronland

Johann Marcus

Geboren 1595 zu Landskron in Böhmen; gestorben 1667 in Prag. Er war Arzt, zuletzt Professor der Medizin in Prag. Marcus Marci behandelte das Problem vom Stoß der Körper, arbeitete ferner über prismatische Farbenzerstreuung. Auch philosophische Schriften hat Marcus Marci veröffentlicht.

Literatur. *Guhrauer, M. M., in der Zeitschr. f. Philosophie Bd. 21, 1852. — **Rosenberger** Gesch. d. Phys. II, S. 125, Braunschweig 1884*

E. Drude.

Märcker

Max.

Geboren am 25. Oktober 1842, gestorben am 19. Oktober 1901 in Halle, ein ausgezeichneter Agrikulturchemiker, der zur hohen Blüte der landwirtschaftlichen Institute an der Universität Halle wesentlich beigetragen hat. Aus Limprichts Schule hervorgegangen, widmete er sich sehr bald (seit 1866) der landwirtschaftlichen Chemie. Er hat 30 Jahre lang die von ihm großzügig organisierte Versuchsstation in Halle geleitet. Durch Ausbildung der mannigfaltigen analytischen Methoden der Agrikulturchemie hat Märcker sich besondere Verdienste erworben. Sein Handbuch der Spiritusfabrikation, jetzt in 7. Auflage erschienen, gilt als das beste Werk dieser Art. Seine agrikulturchemischen Forschungen haben unmittelbar und mittelbar der Landwirtschaft reichen Nutzen gebracht.

Literatur. *Ueber Leben und Wirken Märkers siehe Nekrolog von **M. Delbrück,** Ber. **34,** 4457.*

E. von Meyer.

Marey

Etiennes Jules.

1840 bis 1904, der Meister der graphischen Methodik in der Biologie. Er stammte aus Beaune (Côte-d'Or), studierte seit 1849 in Paris, wurde 1855 Interne, promovierte 1859 mit seiner These über den Blutkreislauf, begründete aus eigenen Mitteln 1864 zur Erweiterung seiner Experimentaluntersuchungen ein Laboratorium, das erste seiner Art in Frankreich und wurde 1869 als Nachfolger von Flourens Professor der organischen Naturgeschichte am Collège de France, 1872 Mitglied der Académie de médecine,

1878 als Nachfolger von Claude Bernard Mitglied des Instituts. Mareys Arbeiten bewegen sich hauptsächlich in der Ausbildung und Pflege der graphischen Methodik, die er mit autographischen, selbstregistrierenden Hilfsmitteln bereicherte, verfeinerte und in zahlreichen Gebieten der Biologie zur Geltung brachte. Marey ist in dieser Beziehung als Förderer und Erweiterer der deutschen Arbeiten von Carl Ludwig, Helmholtz und Vierordt anzusehen. Zu nennen ist zunächst sein „direkter Sphygmograph" zur exakten Registrierung der Kreislaufvorgänge in Gestalt einer zuverlässigen Pulskurve, ferner sein genial ersonnenes „Luftübertragungsverfahren" mit den zwei Mareyschen Kapseln" zur „Kardiographie" (Aufzeichnung des Herzstoßes), die in Verbindung mit elastischen Hohlsonden eine wesentliche Verbesserung des Manometers bedeuten. Auch die Konstruktion eines vervollkommneten Myographen für die Aufzeichnung der Muskelbewegung ist Marey zu danken. Später gesellte sich hierzu seine eingehende Beschäftigung mit der Registrierung durch die Photographie. Seine Studienergebnisse sind hauptsächlich in folgenden Schriften niedergelegt. Physiologie médicale de la circulation du sang (Paris 1863); Du mouvement dans les fonctions de la vie (1868); La méthode graphique et ses applications dans la physiologie (1878) u. a.

Literatur. *Jahresber. von Waldeyer-Posner 1904. Nekrologie.*

J. Pagel.

Marggraf
Andreas Sigismund.

Geboren 1709, gestorben 1782 zu Berlin, wo er bis auf seine Studienzeit, sein ganzes Leben zubrachte, war als Analytiker hervorragend, wie besonders seine Arbeiten über Phosphorsäure, Tonerde und Magnesia erkennen lassen. Seine Beobachtungen verschärfte er dadurch, daß er als erster das Mikroskop zum Nachweis charakteristischer Stoffe anwendete. So schloß er 1747 aus der gleichen Kristallform des Rohrzuckers und des aus Rübensaft erhaltenen süßen Stoffes auf die Gleichheit beider und wurde, unterstützt durch seinen Schüler Achard, der Begründer der Rübenzuckerindustrie, die freilich erst 100 Jahre später begann, sich mächtig zu entwickeln. Seine Abhandlungen, in denen er bis zu seinem Tode eifriger Anhänger der Phlogistonlehre blieb, sind in den Denkschriften der Berliner Akademie, der er als Direktor der physikalischen Klasse angehörte, erschienen.

E. von Meyer.

Marignac
J. C. Galissard.

Geboren am 24. April 1817 in Genf, gestorben daselbst am 15. April 1894, hat sich, abgesehen von einer früheren Untersuchung über Naphtalin, durch seine sorgfältigen Bestimmungen der Atomgewichte zahlreicher Elemente verdient gemacht. Seine übrigen Forschungen betrafen ebenfalls Teile der anorganischen und mineralogischen Chemie, deren Kenntnis er wesentlich bereicherte.

Literatur. *Nekrolog in Ber.* **27**, *979.*

E. von Meyer.

Mariotte
Edme.

Geboren 1620 in Dijon, gestorben am 12. Mai 1684 in Paris. Er war Priester zu St. Martin-sous-Beaune bei Dijon, wurde 1666 zum Mitglied der Pariser Akademie ernannt. Mariotte wird vielfach als der Gründer der Experimentalphysik angesehen; er stellte Untersuchungen über die farbigen Ringe der Sonne und des Mondes an; 1666 entdeckte er den blinden Fleck im Auge. Die Physik hat er durch wichtige Beobachtungen über Mechanik der Flüssigkeiten und Gase bereichert. Das nach ihm benannte Gesetz (1697) hat zwar Boyle zum Entdecker, doch hat erst Mariotte es streng formuliert und mit großem Erfolg verwertet, so zur barometrischen Höhenmessung.

Literatur. ***Muteau et Garnier,*** *Galerie bourgignonne, Dijon 1858/60, Bd. 2, S. 219.* — ***Condorcet,*** *Éloge des académiciens.*

E. Drude.

Markownikow
Wladimir.

Geboren am 22. Dezember 1838 in Nischninowgorod, gestorben am 11. Februar 1904 zu Moskau, wo er seit 1873 Universitätsprofessor war, nachdem er zuvor in Kasan als Dozent und Professor seit 1867 gewirkt hatte. Aus der Schule Butlerows hervorgegangen, durch Studien bei Baeyer und bei Kolbe ausgebildet, hat Markownikow seine Forscherkraft der organischen Chemie gewidmet, deren Einzelgebiete er wesentlich erweitert hat. Besonders bedeutungsvoll sind seine Arbeiten über die Naphtene, die er im kaukasischen Erdöl auffand und gründlich durchforschte.

Literatur. *Nekrolog in Ber.* **38**, *4249.*

E. von Meyer.

Maschine.

1. Einleitung. 2. Allgemeine Ausführungen über die wichtigsten Maschinenarten der Technik: a) Kraftmaschinen. b) Zwischenmaschinen. c) Arbeitsmaschinen. 3. Nähere Ausführungen über „Elementare Maschinen" und Maschinenelemente: a) Die Grundformen der elementaren Maschinen: α) Die schiefe Ebene. β) Der Hebel. γ) Die kommunizierenden Röhren. b) Die von den drei Grundformen abgeleiteten einfachen Maschinen: α) Von der schiefen Ebene abgeleitete Maschinen: αα) Der Keil. ββ) Die Keilkette. γγ) Die Schraube. β) Vom Hebel abgeleitete Maschinen: αα) Die Rolle. ββ) Das Wellrad. γγ) Der Flaschenzug. δδ) Die Zahnräder. εε) Riemen- und Seilscheiben. γ) Von den kommunizierenden Röhren abgeleitete Maschine: Die hydraulische

Presse. δ) Das Schneckengetriebe. 4. Maschinenelemente. α) Maschinenelemente zur Verbindung von Maschinenteilen. β) Maschinenelemente der drehenden Bewegung. γ) Maschinenelemente der hin- und hergehenden Bewegung. δ) Maschinenteile zur Aufnahme und Fortleitung von Flüssigkeiten. ε) Sperr- und Bremswerke sowie Ventile. ζ) Regelnde Maschinenelemente.

1. Einleitung. Unter dem Begriff „Maschine" verstehen wir eine Anordnung zum Zwecke der Umwandlung der in der Natur sich vorfindenden Energie in „techsche" Arbeit.

Diesen Zweck hat die Maschine mit dem Werkzeug gemein; der Unterschied liegt in der „Bodenständigkeit" der Maschine, während das Werkzeug während seines Gebrauches sich nicht in Berührung mit dem Boden befindet. Werkzeuge, die mit Elementarkraft betrieben werden, z. B. Druckluftmeißel, sind deshalb keine Maschinen, während eine Schreibmaschine mit Recht unter die Maschinen gezählt wird. Auf Maschinen zur Fortbewegung in der Luft trifft die obige Definition nicht zu.

Die Entwickelung der Technik hat heute dahin geführt, daß die Umwandlung der Energie in „technische" Arbeit meistens in drei wesentlich voneinander getrennten hintereinander geschalteten maschinellen Vorrichtungen vorgenommen wird. Die erste dieser Vorrichtungen nimmt die von der Natur dargebotene Energie auf und verwandelt sie in mechanische Arbeit. Man nennt diesen Teil der maschinellen Vorrichtung Kraftmaschine oder Motor. Die von der Kraftmaschine dargebotene mechanische Arbeit wird fortgeleitet durch mehr oder weniger komplizierte Zwischenmaschinen zu demjenigen Teil der Anlage, dem die Nutzbarmachung der Energie zufällt, zur Arbeitsmaschine, in der die mechanische Arbeit in „technische Arbeit" umgesetzt, d. h. zur Erzielung eines technischen Effektes verwendet wird.

Auf früheren, weniger vorgeschrittenen Entwickelungsstufen der Technik wurde meistens die Kraftmaschine mit der Arbeitsmaschine eng verbunden. Als Beispiele führen wir die Schöpfwerke des alten Aegyptens und die Pochwerke des mittelalterlichen Bergwerksbetriebes an. Die Figur 1 zeigt, wie die Welle des antreibenden Wasserrades direkt dazu eingerichtet ist, die Pochstempel zu heben, durch deren Fall das Erz zerkleinert wird. Auch heute wird oft die Kraftmaschine mit der Arbeitsmaschine direkt verbunden; man vergleiche hierzu die Walzenzugmaschinen, bei denen die Arbeitswalzen unmittelbar mit der verlängerten Welle der Antriebsdampfmaschine verbunden sind.

2. Allgemeine Ausführungen über die wichtigsten Maschinenarten der Technik. In der nachfolgenden Darstellung unterscheiden wir also: a) Kraftmaschinen, b) Zwischenmaschinen, c) Arbeitsmaschinen.

2a) Kraftmaschinen. Maschinen, welche in der Natur vorhandene Energie aufnehmen und wieder als mechanische Energie zur Verfügung stellen, sind: Wärmekraftmaschinen, Wasserräder, Turbinen, Windmotoren, betreffs deren auf die besonderen Artikel verwiesen sei.

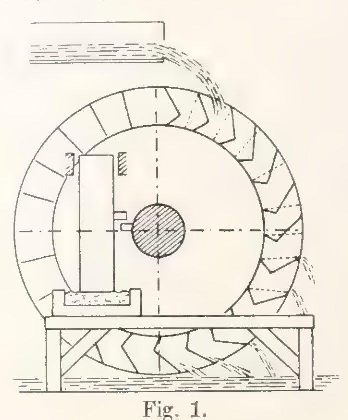


Fig. 1.

2b) Zwischenmaschinen. Diese sind je nach der Entfernung, die durch die Energieübertragung überbrückt werden soll, mehr oder weniger komplizierter Natur. Sind die Entfernungen klein, so überträgt man die von der Kraftmaschine dargebotene mechanische Energie mittels Seil oder Riementrieb auf die Arbeitsmaschine. Bei dieser Methode beträgt die obere Grenze für die zu überbrückende Entfernung bei Anwendung der Drahtseilübertragung etwa 1000 m. Jenseits dieser Grenze sinkt der Wirkungsgrad derartiger Zwischemmaschinen mit wachsender Entfernung schnell unter das wirtschaftlich zulässige Maß.

Ihre Hauptrolle als Energie übertragende Anordnungen spielen besonders die Riemenübertragungen in den Fabriken bei der Verteilung der mechanischen Arbeit auf viele kleinere Arbeitsmaschinen. Man gelangt so zum Begriff der Transmissionen und bezeichnet damit Anlagen, die aus den Transmissionswellen, den Riemenscheiben, den Riemen und den Vorgelegen bestehen, welch letztere noch mit Ein- und Ausrückvorrichtungen versehen sind.

Handelt es sich darum, große Energiemengen auf weite Entfernungen fortzuleiten und auf große Gebiete zu verteilen, dann greift man zum Umweg der Fortleitung auf elektrischem Wege. Hierbei wird die von der Kraftmaschine dargebotene mechanische Arbeit mit Hilfe einer Dynamomaschine in elektrische Arbeit verwandelt, welch letztere durch die elektrische Leitung zum Elektromotor übergeführt wird, um an dessen

Welle wieder als mechanische Arbeit zur Verfügung zu stehen. In besonderen Fällen, falls die zu übertragenden Leistungen besonders groß und die zu beherrschenden Verteilungsgebiete besonders ausgedehnt sind, greift man bei der elektrischen Uebertragung zu einem weiteren Zwischenglied, zum Transformator. In diesem Falle ist die Dynamomaschine als Wechselstrommaschine ausgebildet. Der Transformator hat die Aufgabe, die von dieser gelieferte elektrische Arbeit so umzugestalten, daß sie für die wirtschaftliche Fortleitung im Kupferdrahte besonders geeignet wird. Betreffs der Dynamomaschinen, Elektromotoren und Transformatoren verweisen wir auf die betreffenden Artikel.

Einige weitere Energieübertragungs- und Verteilungssysteme werden in besonderen Fällen angewendet. Es handelt sich um das Druckluft- und um das Preßwasserkraftübertragungssystem. Bei ihnen wird die mechanische Arbeit der Kraftmaschine durch einen Kompressor in potentielle Energie einer Wasser- resp. Luftmenge verwandelt. Durch Fortleitung der komprimierten Luft- resp. des Wassers leitet man zugleich die Energie fort und man kann diese an entfernten Punkten mit Hilfe von Druckluft- oder Preßwassermotoren wieder in mechanische Energie zurückverwandeln. Es würde zu weit führen, hier die technischen Bedingungen zu schildern, unter denen derartige Uebertragungsmethoden zweckmäßig sein können.

2c) Arbeitsmaschinen. Die Bestimmung der Arbeitsmaschinen kann man nach den Gesichtspunkten der Orts- und Formänderung klassifizieren.

Arbeitsmaschinen zur Ortsveränderung. Hierher gehören alle Hebe- und Transportmaschinen, Krane, Pumpen, Ventilatoren, Kompressoren und Lokomotiven, wegen deren eingehender Erörterung wir auf die Artikel „Transportmaschinen“ und „Wasserkraftmaschinen“ und „Wasserhebemaschinen“ verweisen.

Arbeitsmaschinen zur Formveränderung. Hierher gehören die Werkzeugmaschinen, besonders die Werkzeugmaschinen zur Bearbeitung fester Stoffe. Die Arbeitsweise dieser Maschinen soll hier etwas eingehender besprochen werden.

Die Bearbeitung fester Stoffe erfolgt auf Grund zweier verschiedener Eigenschaften der Stoffe, und zwar auf Grund der Dehnbarkeit und auf Grund der Teilbarkeit. Diese beiden Eigenschaften beruhen auf der Plastizität und der endlichen Festigkeit der uns bekannten Materialien.

Die bekannteste Art eines Vorganges, bei dem die Plastizität und die Festigkeit eines Stoffes beobachtet werden können, dürfte wohl die Zerreißung eines Metallstabes, z. B. weichen Eisens sein. Es kommt, wenn man einen solchen Stab einem axialen Zug unterwirft und die zu den Formänderungen λ gehörenden Zugkräfte P vertikal, jene horizontal in einem Koordinatensystem aufträgt, das in der Figur 2 gezeichnete Diagramm zustande.

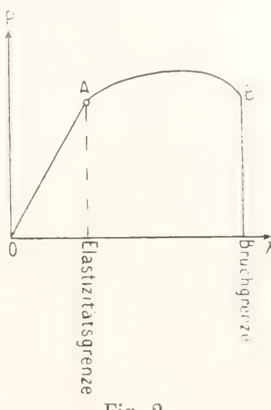


Fig. 2.

Besonders bemerkenswert ist hier zunächst der Punkt A des Diagramms, der den Beginn des Fließens des Stabmaterials kennzeichnet. Die Formänderungen im Fließgebiet AB sind wesentlich bleibend (plastisch) gegenüber denjenigen im Elastizitätsgebiet OA. Auf der Eigenschaft des Eisens und seiner Legierungen vor Erreichung des Fließbeginns (in kaltem Zustand) elastisch zu sein, beruht die Verwendung dieses Körpers zur maschinellen Konstruktion; es ist das Bestreben der Technik, die Fließgrenze des Eisens durch geeignete Legierung so hoch wie möglich zu legen. Oberhalb der Elastizitätsgrenze ist die Form des Materials von den formändernden Kräften unabhängig. Dies gilt bis zu einer gewissen maximalen Formänderung, jenseits welcher es keinen Zusammenhalt der Materialteile mehr gibt; das Material zerreißt.

Eine wichtige, die Bearbeitungstechnik unterstützende Eigenschaft vieler Körper, besonders des Eisens ist die, daß durch Erwärmung die Elastizitätsgrenze erniedrigt wird. Hierdurch wird der Arbeitsverbrauch für die technischen Formänderungsprozesse bedeutend vermindert. Bei manchen Körpern, wie z. B. Ton, Blei, ausgeglühtem Kupfer ist übrigens schon im kalten Zustand von einer Elastizitätsgrenze keine Rede.

Maschinen zur Bearbeitung von Materialien auf Grund ihrer Dehnbarkeit. Bei gewöhnlicher Temperatur wird das Ziehen vorgenommen, ein Verfahren, welches für die Draht- und Röhrenfabrikation besonders wichtig ist. Auch das Walzen kann bei niedriger Temperatur vorgenommen werden, indessen wird beim

Walzen im allgemeinen höhere Temperatur angewendet. Besonders die Herstellung von Eisenbahnschinen, von Trägern, sowie von Kesselblechen erfolgt in den Walzwerken bei Temperaturen, die bei Rotglut und darüber liegen.

Der Ziehprozeß erfolgt nach der Figur 3 in der Weise, daß man das schon vorgeformte Arbeitsstück durch ein entsprechend gestaltetes Loch des sogenannten Zieheisens E hindurchzieht. Handelt es sich um Draht, so ist das Resultat des Ziehprozesses, daß der Draht durch den Arbeitsprozeß von einem Durchmesser D auf einen d „heruntergezogen" wird. Der Ziehprozeß kennzeichnet sich dadurch, daß das Werkzeug feststeht und das Arbeitsstück sich bewegt.

Beim Walzen bewegt sich (s. Fig. 4) sowohl der Arbeitskörper A wie auch das

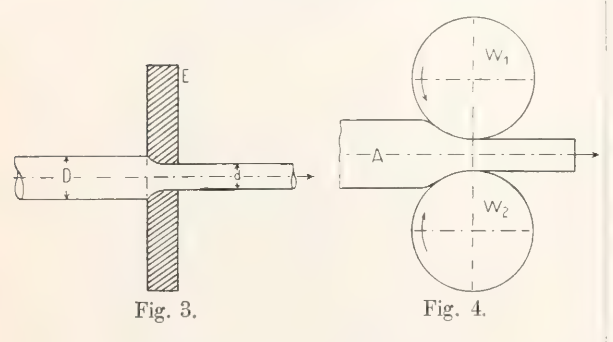


Fig. 3. Fig. 4.

Werkzeug, d. h. die Walzen W_1 und W_2. Nach diesem Verfahren werden in unseren Hüttenwerken viele Tausende von Tonnen stählerner und eiserner Schienen hergestellt. Der Arbeitsbedarf der Walzenzugmaschinen ist entsprechend den gewaltigen Leistungen sehr beträchtlich. 10000 PS. für eine Maschine sind keine Seltenheit.

Die Vorgänge im Innern des Materials beim Walzen sind oft untersucht worden. Walzt man ein aus einem Bündel paralleler Eisenstäbe zusammengeschweißtes Paket zu einer Schiene aus und ätzt man die Querschnitte an, so werden Schweißfugen sichtbar und geben ein deutliches Bild der Materialverzerrung (s. Fig. 5 a—d). Weiterhin kann man Walzblöcke mit quer zur Achse eingeschobenen Stäbchen versehen, deren Gestaltsänderung nach dem Walzen durch Anätzen der Schnittfläche des parallel zur Achse ausgeschnittenen Blockes sichtbar gemacht wird (s. Fig. 6).

Maschinen zur Bearbeitung der Materialien auf Grund ihrer Teilbarkeit. Die Erörterung der Bearbeitung der Stoffe auf Grund ihrer Teilbarkeit hat auszugehen von der Einwirkung des Werkzeuges auf den Stoff. In der Figur 7 sei A ein Stück eines zu bearbeitenden Körpers, der der Einwirkung des Schneidewerkzeuges B unterworfen ist. Wir sehen die Schneide C des Werkzeuges in den Körper eingedrungen unter Einfluß der durch den horizontalen Pfeil gekennzeichneten Kraft P, wobei der Körper A fest eingespannt ist. Die Kraft P kann man sich zerlegt denken in zwei Komponenten, von denen die mit N bezeichnete lediglich einen Druck auf den nicht angegriffenen Teil des Körpers hervorruft, während die Komponente N_1 diejenige ist, die die Bearbeitung, d. h. die Teilung oder die Abtrennung des Spanes S bewirkt. Dieses Abtrennen des Materials erfolgt in der Weise, daß von der Schneide C des Werkzeuges aus sich eine Abschiebungsfläche CD ausbildet, längs welcher der Span von dem noch unverletzten Teil des Arbeitsstückes abgehoben wird. Ist die Abhebung resp. die Trennung längs CD erfolgt, so ist die Bahn für das weitere Durchdringen des Schneidewerkzeuges frei gemacht. Er rückt dann so weit vor, bis die Kraftwirkung auf das Arbeitsstück wieder so groß geworden ist,

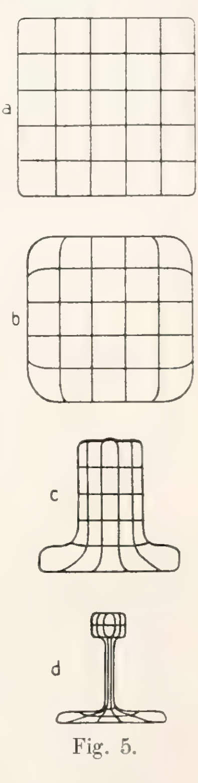
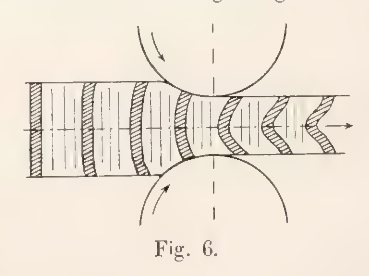


Fig. 5.


Fig. 6.

daß längs einer neuen Fläche CD eine weitere Abschiebung erfolgt.

Die Beobachtung hat gezeigt, daß zwischen dem Schneidwinkel α des Werkzeuges und dem Wirkungswinkel γ (s. Fig.) für jedes Material ein bestimmter Zusammenhang besteht. Eine einfache Ueberlegung zeigt, daß mit wachsendem α Winkel γ abnehmen muß. Ohne Unterschied des verwendeten Materials und bei Spandicken, die innerhalb ziemlich weiter Grenzen beliebig gewählt

werden können, findet man, daß die Summe beider Winkel zwischen 145° und 155° schwankt.

Der hiermit geschilderte Vorgang der Stoffbearbeitung liegt der größten Zahl

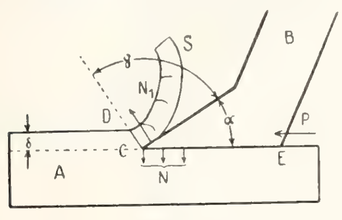


Fig. 7.

der in unseren Fabriken üblichen Werkzeugmaschinen zugrunde: nämlich den Drehbänken, den Hobelmaschinen, den Fraismaschinen, den Sägen, den Bohrmaschinen, den Scheren und den Stanzen. Die letzten beiden Maschinenarten bilden einen Spezialfall, in dem bei ihnen der Winkel α annähernd $= 90^{\circ}$ wird (s. Fig. 8).

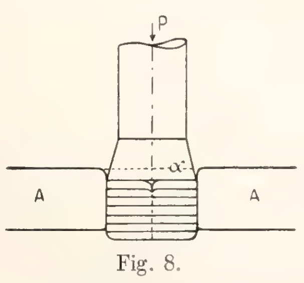


Fig. 8.

Die praktische Erfahrung hat festgestellt, daß in bezug auf den Arbeitsbedarf es nicht gleichgültig ist (bei den verschiedenen Materialien) mit welchem Winkel α gearbeitet wird, ferner hat man gefunden, daß es nicht zweckmäßig ist, die nicht arbeitenden Flächen CE des Werkzeuges auf dem Arbeitsstück aufliegen zu lassen. Man zieht es daher vor, das Werkzeug unter einem bestimmten Anstellungswinkel i arbeiten zu lassen. Dieser Winkel beträgt einige Grade (Fig. 9).

Bei den oben genannten Maschinen wird nun grundsätzlich nach zwei verschiedenen Methoden verfahren. Man unterscheidet Maschinen mit feststehendem Arbeitsstück, bei denen durch die Bewegung des Schneidwerkzeuges die Spanabtrennung erfolgt. Hierher gehören Hobelmaschinen, Fraismaschinen, Sägen, Bohrmaschinen, Scheren, Stanzen, Lochmaschinen. Ferner solche Werkzeugmaschine, bei denen das Werkzeug feststeht und das Arbeitsstück sich bewegt, die Drehbank, sowie bestimmte Arten der Hobelmaschine. Bei allen Maschinen wird außer der bisher geschilderten Arbeitsbewegung noch eine zweite Bewegung ausgeführt, die sogenannte Schaltbewegung, durch welche bewirkt wird, daß die verschiedenen Spanabhebungen sich aneinander reihen, so daß eine zusammenhängende Fläche zustande kommt.

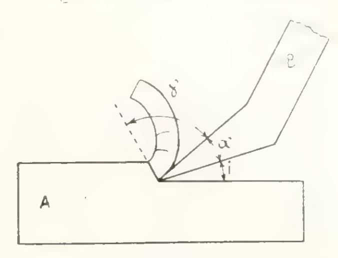


Fig. 9.

Beide Bewegungen werden mit Geschwindigkeiten ausgeführt, die durch die Erfahrung festgelegt sind. Man kann die Arbeitsgeschwindigkeit um so größer wählen, je kleiner die Schaltgeschwindigkeit ist.

Großes Interesse beansprucht der Arbeitsverbrauch einer Werkzeugmaschine. Dieser setzt sich zusammen aus zwei Teilen, die wir mit N_1 und N_2 bezeichnen wollen, und von denen N_1 die Leergangs- und N_2 die Nutzarbeit heißt. Die Nutzarbeit wird dazu verwendet, um ein bestimmtes Stoffquantum durch den Arbeitsvorgang abzutrennen, man kann daher N_2 angeben, wenn das pro Stunde abgetrennte Stoffquantum bekannt ist, sowie die für ein Kilogramm erforderliche Arbeit. Durch Versuche ist festgestellt, daß man bei Hobelmaschinen zum Abtrennen von 1 kg Stahl 0,25 PSH., für Schmiedeeisen 0,12, für Gußeisen 0,11 und für Bronze 0,03 PSH. (= Pferdekraftstunde) braucht. Berücksichtigt man ferner, daß der mechanische Wirkungsgrad der Werkzeugmaschine etwa 0,6 bis 0,8 beträgt, so ist man in der Lage, die in die Maschine einzuleitende mechanische Energie anzugeben. Nachstehend geben wir noch den spezifischen Arbeitsverbrauch für einige Maschinenarten an:

Metallfraismaschinen verbrauchen für hartes Gußeisen 0,24 PSH pro Kilogramm. Holzfraismaschinen verbrauchen ca. 25 PSH für den Kubikmeter Späne, für weiches Holz, 70 PSH bei hartem Holz. Bohrmaschinen brauchen pro Kilogramm abgehobelter Späne im Mittel 0,10 PSH. Drehbänke 0,07 bis 0,10 PSH.

3. Nähere Ausführungen über „Elementare Maschinen" und über „Maschinenelemente". **3a) Die Grundformen der elementaren Maschinen.** Die unter 2 besprochenen Maschinen stellen sich der näheren Betrachtung dar als vielgliedrige und weitverzweigte Ketten von gewissen einfacheren Teilen, die für sich betrachtet werden können. Man nennt diese Teile „Einfache oder elementare Maschinen".

Sie lassen sich auf drei Grundformen zurückführen, nämlich auf die schiefe Ebene, den Hebel und die kommunizierenden Röhren.

α) Die schiefe Ebene. Wird auf eine horizontale Ebene eine Last Q gelegt (Fig. 10), so wissen wir, daß dieselbe im Gleichgewicht bleibt. Das Gewicht Q ruft in der Unterlagsebene einen gleichen, Q gerade entgegengesetzt wirkenden Normaldruck N hervor, der Q gerade aufhebt. Wir wissen ferner, daß zur Fortbewegung der Last auf der Horizontale eine Kraft P erforderlich ist, die proportional ist dem Gewichte Q, resp. dem Normaldruck auf die Horizontale und den Koeffizienten der Reibung zwischen der Last und der Ebene.

$$P = Q \cdot \mu$$

Die Größe μ hängt von den physikalischen Eigenschaften der horizontalen Oberfläche und des Körpers Q ab und beträgt in praktisch vorkommenden Fällen Bruchteile von 1. Nehmen wir jetzt an, daß die Ebene gegen die Horizontale um den Winkel α geneigt (Fig. 11) sei, so wissen wir, daß die Kraft,

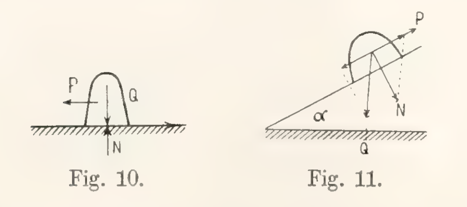


Fig. 10. Fig. 11.

die zum Fortziehen des Körpers auf der geneigten Ebene erforderlich ist, wächst, denn jetzt hat die Kraft nicht nur die Reibung zu überwinden, sondern auch die Schwere des Körpers und zwar die parallel der Ebene wirkende Komponente der Schwere. Wir erhalten dann die Gleichung

$$P = Q \cdot (\sin \alpha + \mu \cos \alpha)$$

Diese Gleichung dient zur Beurteilung der Wirksamkeit der schiefen Ebene als Maschine. Wir setzen zunächst den Fall, daß die Reibung $\mu = 0$ sei. Es wird dann

$$P = Q \cdot \sin \alpha$$

d. h. die schiefe Ebene setzt uns in den Stand, ein Gewicht Q zu heben. Die dazu erforderliche Kraft ist proportional dem sinus des Neigungswinkels der Ebene kleiner als die zu hebende Last. Durch diese Eigenschaft der schiefen Ebene sind wir imstande, Lasten zu heben oder Kräfte auszuüben unter Aufwendung kleinerer Kräfte. Durch das Hinzutreten der Reibung wird die prinzipielle Wirksamkeit der Maschine nicht wesentlich beeinflußt.

β) Der Hebel. Der Hebel ist ganz allgemein als Vorrichtung bekannt, um mit Hilfe kleiner Kräfte relativ große Gegenkräfte zu überwinden. Wir wissen, daß reine am kurzen Hebelarm wirkenden Kraft Q (Fig. 12) das Gleichgewicht gehalten werden kann durch eine am langen Hebelarm wirkende Kraft P, die proportional dem Verhältnis der beiden Hebelarme a zu b kleiner ist als Q.

γ) Die kommunizierenden Röhren. Die kommunizierenden Röhren werden im allgemeinen bei der Aufzählung der einfachen Maschinen in der Physik nicht berücksichtigt. Wir halten sie jedoch für wichtig genug, um hier besonders behandelt zu werden, da sich auf ihnen eine Reihe wichtiger technischer Einrichtungen aufbaut. Ihre Wirkung beruht auf dem Archimedesschen Gesetz, der nach allen Richtungen gleichmäßig erfolgenden Ausbreitung des hydrostatischen Druckes p in einer Flüssigkeit (Fig. 13) (vgl. den Artikel „Flüssigkeit“). Hiernach ist man zunächst

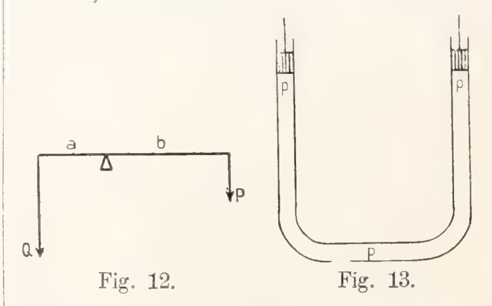


Fig. 12. Fig. 13.

allerdings nur in der Lage, Kraftwirkungen fortzupflanzen; eine Vervielfältigung der Kraftwirkung im maschinellen Sinne wie bei schiefer Ebene und beim Hebel kommt erst zustande, wenn die kommunizierenden Röhren mit hydraulischen Zylindern verschiedenen Querschnitts verbunden werden. Hierüber werden wir weiter unten unter „Hydraulische Presse“ sprechen.

3b) Die von den drei Grundformen abgeleiteten einfachen Maschinen. Aus jeder der unter 3a besprochenen Grundformen der einfachen oder elementaren Maschinen haben sich im Laufe der technischen Entwickelung eine oder mehr höher organische Maschinen entwickelt, die erst eigentlich zu maschinellen Leistungen im technischen Sinne befähigt sind.

α) Von der schiefen Ebene abgeleitete Maschinen. *αα*) Der Keil wird in der Weise zur Ausübung von Kraftwirkungen benutzt, daß man die Kraft nicht an dem zu hebenden resp. zu bewegenden Körper angreifen läßt, sondern an der Ebene selbst. Eine Ausführung einer derartigen Vorrichtung ist in der Figur 14 gezeichnet. Es wirkt auf den Keil die Kraft P, um die zwischen Gleitbacken geführte Last Q zu heben. Eine einfache Betrachtung lehrt, daß

$$P = Q \cdot tg\alpha$$

sein muß, wenn das System im Gleichgewicht sein soll. Wird

$$P > Q \cdot tg\alpha$$

dann wird die Last gehoben.

Dieser Satz gilt jedoch nur, wenn weder zwischen dem Gegenlager des Keiles noch zwischen Keil und Last noch zwischen Last und Führung eine Reibung stattfindet. Ist jedoch der für die ebengenannten Berührungsebenen in Betracht kommende Reibungskoeffizient

$$\mu = tg\varrho$$

so lautet die Kraftgleichung anders und zwar:

$$P = Q \cdot tg(\alpha + 2\varrho)$$

Hier bietet sich Gelegenheit, vom mechanischen Wirkungsgrade der Maschine zu reden. Ganz allgemein ist der Wirkungsgrad der Quotient zwischen theoretischer und tatsächlicher Leistung der Maschine. Theoretisch, d. h. ohne Berücksichtigung der Reibung, würde die Kraft

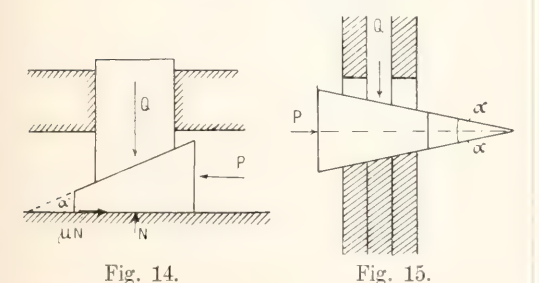


Fig. 14. Fig. 15.

$$P = Q \cdot tg\alpha$$

aufzuwenden sein; mit Berücksichtigung der Reibung wird diese Kraft

$$P = Q \cdot tg(\alpha + 2\varrho)$$

der Wirkungsgrad also

$$\eta = \frac{tg\alpha}{tg(\alpha + 2\varrho)}$$

da ja die Leistung der Kraft proportional ist.

$\beta\beta$) Die Keilkette besteht aus zwei Keilen (s. Fig. 5). Die Kraftgleichung lautet hier

$$P = \frac{2Q \cdot tg(\alpha + \varrho)}{1 - tg\varrho \cdot tg(\alpha + \varrho)}$$

Der Wirkungsgrad wird

$$\eta = \frac{tg\alpha}{tg(\alpha + \varrho)}$$

$\gamma\gamma$) Die Schraube entsteht durch Umwickelung einer schiefen Ebene um einen Zylinder (s. Fig. 16). Man unterscheidet bei ihr die Ganghöhe h und den mittleren Radius der Schraubenwindung r. Hiermit wird der Steigungswinkel der Schraube

$$tg\alpha = \frac{h}{2\pi r}.$$

Jetzt können wir sofort die Kraftgleichung anschreiben, indem wir die bewegende Kraft P mit Hebelarm r angreifen lassen. Die Last Q, welche ihrerseits an der Schraubenmutter angreift, steht dann zu P in folgender Beziehung:

$$P = Q \cdot tg(\alpha + \varrho).$$

Kombiniert man jetzt die Schraube noch mit einem Hebel, indem man statt der am Hebelarm r wirkenden Kraft P die am Hebel-

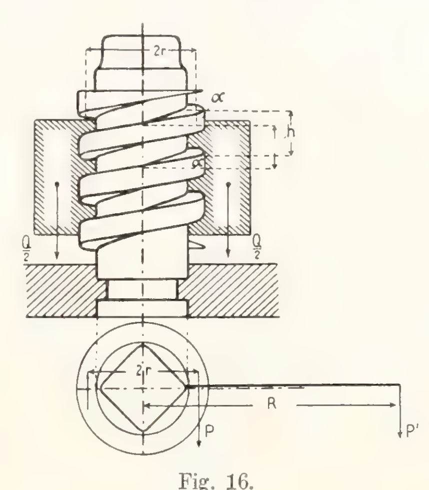


Fig. 16.

arm R wirkende Kraft P′ einführt, so erhält man die Kraftgleichung der kombinierten Maschine: Hebel-Schraube

$$P' = Q \cdot \frac{r}{R} \cdot tg(\alpha + \varrho)$$

β) Vom Hebel abgeleitete Maschinen. $\alpha\alpha$) Die Rolle ist vom gleicharmigen Hebel abgeleitet. Sie entsteht dadurch, daß man sich den gleicharmigen Hebel so oft vervielfältigt denkt, daß er eine runde Scheibe ausfüllt. Mit der Rolle ist man daher nur imstande, bei Abwesenheit der Reibung gleiche Kräfte, jedoch von geänderter Richtung mit Hilfe eines Seiles auszuüben. Das Vorhandensein der Reibung nötigt uns jedoch, diese Gleichung zu modifizieren.

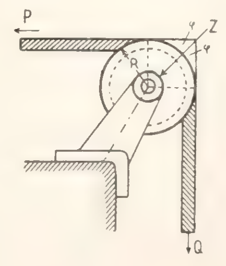


Fig. 17.

Zu Reibungsverlusten geben verschiedene Punkte der Rolle Anlaß: Die Drehung der Achse der Rolle in ihren Lagern, kurz Zapfenreibung genannt, sowie der Widerstand des um die Rolle geschlungenen Seiles oder der Kette gegen Biegung, kurz Steifigkeitswiderstand genannt. Beide Widerstandsarten

sind einer theoretischen Untersuchung zugänglich; für ihre praktische Beurteilung begnügt man sich jedoch mit der Angabe sogenannter Widerstandskoeffizienten, d. h. von absoluten Zahlen, die angeben, welcher Bruchteil der den Widerstand hervorrufenden Kraftwirkung als Widerstand selbst in Frage kommt.

Betrachten wir zunächst die Zapfenreibung der Rolle, so ergibt sich, daß diese sich als ein Moment äußert, welches der beabsichtigten Drehung der Rolle entgegengesetzt ist. Der Hebelarm des Momentes ist gleich dem Zapfenradius r und die an diesem Hebelarm wirkende Kraft ist der tangential am Zapfen angreifende Widerstand der Lagerreibung, den man nach dem Coulombschen Gesetz als das Produkt μZ aus Lagerzapfendruck Z und dem Koeffizienten μ der Reibung zwischen Zapfen und Lager angibt (vgl. den Artikel „Reibung").

In anderer Weise macht sich der Steifigkeitswiderstand des Seiles geltend. Dieser tritt auf sowohl an der Auf- wie an der Ablaufstelle des Seiles und er ergibt sich aus dem Widerstande, den das Seil dem Uebergang aus der geradlinigen in die gekrümmte Form oder umgekehrt entgegensetzt. Hervorgerufen wird dieser Widerstand durch biegungselastische Kräfte, sowie durch die innere Reibung des Seilmaterials. Jedenfalls kommt ein Bewegungshemmnis zustande, welches erfahrungsgemäß proportional der im Seil wirkenden Zugkraft Q resp. P gesetzt wird. Den Widerstandskoeffizienten der Seilsteifigkeit bezeichnet man mit ζ, womit die hemmende Kraft gleich wird mit

$$Q.\zeta \text{ oder}$$
$$P.\zeta$$

wenn Q die Zugkraft im gezogenen, P die Zugkraft im ziehenden Teil des Seiles (siehe Fig. 17) bezeichnet. Hiermit sind die Grundlagen für die Aufstellungen der Kraftgleichungen an der Rolle gefunden. Setzt man noch den Radius des Rolle gleich R, so wird diese Gleichung

$$P.R = Q.R + P.R.\zeta + Q.R.\zeta + Z.r.$$

Hier berechnet sich der Zapfendruck Z nach dem Parallelogramm der Kräfte durch

$$Z^2 = P^2 - 2PQ.\cos 2\varphi + Q^2$$

oder, da man für die Bestimmung von Z die Kräfte P und Q annähernd gleichsetzen kann,

$$Z = 2Q \sin \varphi$$

Hiermit berechnet sich

$$P = Q \frac{1 + \zeta + 2 \cdot \frac{r}{R} \sin \varphi}{1 - \zeta}$$

Bezeichnet man den Wert des Bruchstriches mit k, so hat man

$$P = k.Q \text{ oder}$$
$$Q = \eta.P$$

Hier ist η der Wirkungsgrad der Rolle.

Bei der praktischen Ausführung von Rollen und zur Beurteilung ihres Wirkungsgrades benutzt man Tabellen, die sich auf Grund der obigen Formeln sowie auf Versuchen über gleitende Reibung und Seilsteifigkeit (s. d. Artikel „Reibung") aufbauen. Diese Tabellen geben direkt den Wert des Wirkungsgrades für alle praktisch vorkommenden Rollenabmessungen. Die Werte bewegen sich zwischen 0,8 und 0,97 und sind in hohem Grade von der Dicke des Seiles abhängig.

$\beta\beta$) Das Wellrad. Wie dem gleicharmigen Hebel die Rolle, so entspricht dem ungleicharmigen Hebel das Wellrad (Fig. 18).

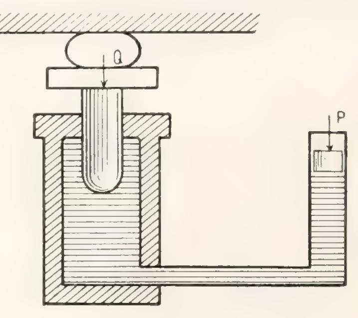


Fig. 18.

Mit ihm ist eine Kraftübersetzung in ganz ähnlicher Weise möglich wie beim Hebel, zugleich jedoch auch eine Richtungsänderung. Die Beurteilung des Wirkungsgrades des Wellrades erfolgt nach denselben Grundsätzen wie bei der Rolle. Man begnügt sich in praktischen Fällen mit der Angabe der entsprechenden Zahl, die sich in einem ähnlichen Gebiet bewegt, wie die Wirkungsgrade der Rolle. Zu bemerken ist noch, daß beim Heben von Lasten mit Wellrädern vielfach Ketten verwendet werden. Der Wirkungsgrad ist dabei im allgemeinen günstiger als im Betrieb mit Seilen, weil die Kette eine geringere Steifigkeit besitzt als das Seil.

$\gamma\gamma$) Der Flaschenzug. Zur Erzielung von großen Kraftwirkungen besitzt man Verbindungen von Rollen, die man als Rollenzüge oder Flaschenzüge bezeichnet. Die Untersuchung des Gleichgewichtes an einem solchen Flaschenzug bedient sich lediglich der Anwendung der Kraftgleichung für die Rolle, die oben abgeleitet ist. In nachstehender Figur 19 ist ein Flaschenzug gezeichnet. Erteilen wir der Rolle, an der die Last Q hängt, die Nummer 1 und bezeichnen

wir die Spannungen im Auf- und im ablaufenden Seil mit T_1 und S_1, so ergibt sich

$$T_1 = S_1 \text{ und}$$
$$Q = T_1 + S_1$$

Für die zweite Rolle ergibt sich

$$T_2 = S_2 \text{ und}$$
$$S_1 = T_2 + S_2$$

usw. Schließlich ergibt sich die Spannung S_{n-1} im gezogenen Seil an der (n—1)ten Rolle, zu

$$S_{n-1} = \left(\frac{1}{1+\frac{1}{\eta}}\right)^{n-1} . Q$$

wo η den bei allen Rollen gleichen Wirkungsgrad bedeutet. Schließlich ergibt sich die

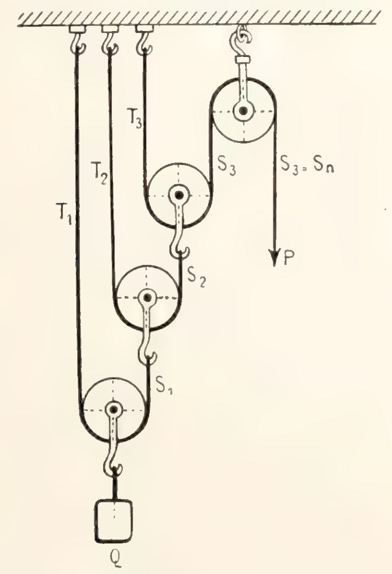


Fig. 19.

Spannung S_n im Zugseil an der letzten festen Rolle

$$S_n = \frac{1}{\eta} . S_{n-1} = P$$

Denkt man sich jetzt sämtliche Rollen reibungslos, d. h. sämtliche $\eta=1$, so würde sich ergeben

$$P = \left(\frac{1}{2}\right)^{n-1} . Q$$

Diese Formel ist die Ursache, daß man den beschriebenen Flaschenzug den **Potenzflaschenzug** nennt.

Außer dem Potenzflaschenzug unterscheidet man noch verschiedene Umkehrungen, resp. Abarten desselben, deren besondere Besprechung sich erübrigt. Jedenfalls ist zu beachten, daß der Wirkungsgrad der Flaschenzüge, da sie sich aus mehreren Rollen zusammensetzen, schlechter ist, als der Wirkungsgrad einer einzelnen Rolle. Die Werte des Wirkungsgrades gehen je nach der Zahl der Rollen herab bis auf 0,3. Auch hier gilt, daß Kettenflaschenzüge höhere Wirkungsgrade haben als Seilflaschenzüge.

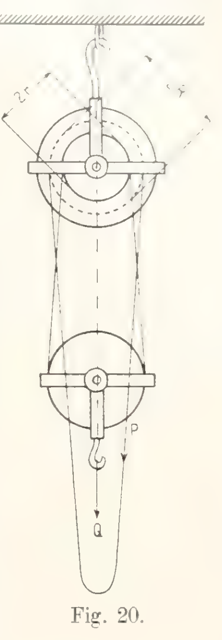


Fig. 20.

Interessant ist noch wegen seiner Einfachheit der von Weston angegebene Differentialflaschenzug. In der Figur 20 ist gezeichnet, wie die Last an der unteren losen Rolle hängt und wie diese von einer Kette getragen wird, welche auf einer Rolle größeren Durchmessers auf und von einer Rolle kleineren Durchmessers abläuft. Im übrigen ist die Kette, wie in der Figur gezeichnet, ohne Ende. Bezeichnet man die Radien der großen und kleinen Rolle mit r und R, so ergibt sich ohne Berücksichtigung der Reibung eine Zugkraft

$$P = Q \cdot \frac{R-r}{2r}$$

Selbstverständlich kommt auch beim Differentialflaschenzug der Wirkungsgrad in Frage. Es muß bemerkt werden, daß trotz der vergleichsweise niedrigen Rollenzahl der Wirkungsgrade namentlich bei zunehmendem Rollenverhältnis $\frac{r}{R}$ rasch abnimmt. Der Wirkungsgrad sinkt oft unter 0,3.

$\delta\delta$) Die Zahnräder. Ein weiteres und zwar sehr wichtiges Mittel zur Ausübung großer Kraftwirkungen bei kontinuierlicher Bewegung sind die Zahnräder, die ebenso wie die Rolle und das Wellrad vom Hebel abgeleitet sind. Wir wollen die wesentlichen, bei Zahnrädern auftretenden Fragen an einem Stirnräderpaar (s. Fig. 21) erörtern. Stirnräder sind Zahnräder mit parallelen Achsen. Wenn 2 Räder, wie in der Figur gezeichnet, miteinander arbeiten, so „stehen sie im Eingriff". Wir nehmen an, daß das treibende Rad M_1 sei, und wir erkennen, wie die Zähne a_1 b_1 c_1 dieses Rades gegen den Zahn a_2 b_2 c_2 des Rades M_2 drückend das letztere herumdreht. Die Berührungspunkte A_1 A_2 A_3 der Zahnpaare $a_1 a_2$, $b_1 b_2$, $c_1 c_2$ liegen auf einer Kurve,

die man als Eingrifflinie bezeichnet. Die Eingrifflinie ist der geometrische Ort der Zahnberührungen. Auf der Verbindungslinie der Mittelpunkte M_1 und M_2 der beiden Räder liegt ein Punkt P, der auf der Zentrale die beiden Teilkreisradien r_1 und r_2

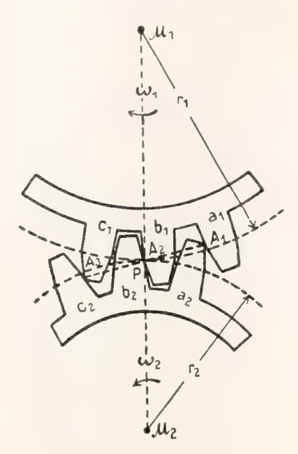


Fig. 21.

abschneidet; ferner hat der Punkt P die Eigenschaft, daß die Richtung der zwischen den Zähnen wirkenden Druckkraft K d. h. die Berührungsnormale der Zahnprofile, stets durch ihn hindurchgeht. Die Teilkreise und die Eingrifflinie sind für die Berechnung des Zahnradgetriebes von größter Wichtigkeit. Einerseits bestimmt der Quotient $r_1:r_2$ das Kraftübersetzungsverhältnis und der reziproke Wert $r_2:r_1$ das Geschwindigkeitsverhältnis zwischen den beiden Rädern, andererseits erhält man geeignete Zahnformen durch die Abwälzung der Eingrifflinie auf den Teilkreisen. Gewöhnlich wählt man als Eingrifflinie die Gerade oder den Kreis und erhält so entweder Evolventen-Verzahnung oder Cycloiden-Verzahnung.

Bei der Beurteilung des Wirkungsgrades einer Kraftübertragung durch zwei Zahnräder hat man, abgesehen von der Lagerreibung an den Achsen der Räder, vor allem die Zahnreibung zu berücksichtigen. Eine Untersuchung der einschlägigen Verhältnisse, auf die wir hier nicht eingehen wollen, findet, daß die Reibungskraft ist

$$R = \mu\pi\, K\left(\frac{1}{z_1}+\frac{1}{z_2}\right)$$

Die zugehörige Arbeit findet man durch Multiplikationen von R mit dem Umfang des Teilkreises des treibenden Rades. Bei gut ausgeführten Zahnrädern liegen die Wirkungsgrade ziemlich hoch

0,8 bis 0,9.

ε) Riemen- und Seilscheiben. Handelt es sich darum, eine Kraftwirkung auf eine größere Entfernung zu übertragen, so bedient man sich der Riemen- oder Seilscheiben. Beide basieren darauf, daß die Reibung eines um ein Rad geeigneter Konstruktion gelegten Riemens oder Seiles groß genug ist, um ein Gleiten auch bei beträchtlichen in den Riemen oder Seilen wirkenden Zugkräften zu verhindern. Zur Beurteilung dieser Verhältnisse, betrachten wir die nebenstehende Figur 22. Es berechnet sich

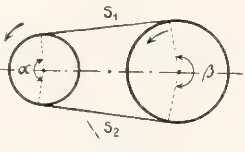


Fig. 22.

die Reibung zwischen dem umgespannten Riemen und dem kleineren Rad zu

$$R_1 = S_2 \cdot (e^{\mu\alpha} - 1)$$

Ebenso ergibt sich für das größere Rad als Widerstand des Riemens gegen Gleiten:

$$R_2 = S_2 \cdot (e^{\mu\beta} - 1)$$

Offenbar darf die zu übertragende Kraft P nicht größer werden, als der kleinere der beiden Reibungsbeträge R_1 oder R_2, d. h.

$$P \leq S_2 \cdot (e^{\mu\alpha} - 1)$$

Diese Gleichungen lehren, daß zur Uebertragung einer bestimmten Kraft P die Spannungen der Riemen oder Seile in den beiden Stücken zwischen den Rädern von verschiedener Größe sein müssen, und daß die Differenz dieser Spannungen gleich der übertragenden Kraft ist.

Die Wirkungsgrade von Riemen und Seiltrieben lassen sich zwar theoretisch berechnen, da hierbei jedoch die Unsicherheit der zugrunde zu legenden Materialkonstanten nicht beseitigt wird, so ist es besser, die Versuche von Kammerer heranzuziehen. Diese Versuche haben ergeben, daß der Wirkungsgrad abhängig ist von der Größe der Riemenspannung und daß ein Maximum des Wirkungsgrades bei 2 bis 6 kg Spannung auf 1 cm Riemenbreite liegt. Die Wirkungsgrade steigen hierbei auf 0,98, wobei zu berücksichtigen ist, daß hierin die Lagerreibung und der Lastwiderstand der Riemenscheiben nicht mit enthalten sind.

γ) Von den kommunizierenden Röhren abgeleitete Maschine: Die hydraulische Presse. Die Figur 23 zeigt das Grundsätzliche dieser Maschine. Die beiden Schenkel der kommunizierenden Röhren sind zu Zylindern geworden, in denen sich Stempel möglichst dicht eingeschliffen bewegen. Die durch Q verhält sich zur Kraft P wie die entsprechenden Stempelquerschnitte.

δ) Das Schneckengetriebe ist die

Kombination einer Schraube mit einem Zahnrad; das eine dieser Glieder ist von der schiefen Ebene, das andere vom Hebel abgeleitet. Man verwendet das Schneckengetriebe da, wo es sich um sehr große Uebersetzungsverhältnisse bei großen Kraftwirkungen handelt. Daß ein Schneckengetriebe für große Uebersetzungsverhältnisse besonders geeignet ist, ergibt sich daraus, daß bei einer einzigen Umdrehung der mit dem Schraubenrad im Eingriff stehenden Schraube das Schraubenrad nur um eine Zahnteilung gedreht wird. Das Uebersetzungsverhältnis ist also gleich der Zähnezahl der Schraubenräder. Es liegt also auf der Hand, daß man durch Erhöhung dieser Zähnezahl ganz beträchtliche Uebersetzungsverhältnisse erzielen kann. Trotz alledem ist das Schneckengetriebe kein sehr wirtschaftliches Kraftübertragungsmittel, da der Wirkungsgrad namentlich bei sogenannten selbstsperrenden Schneckengetrieben, d. h. bei solchen Getrieben, bei denen eine Bewegung durch Antrieb vom Schraubenrad aus unmöglich ist, auf 0,4 sinkt. Will man die Schneckengetriebe wirtschaftlicher gestalten, dann muß man die antreibenden Schrauben zwei- oder dreigängig machen, wobei dann der Vorteil des großen Uebersetzungsverhältnisses auf die Hälfte oder den dritten Teil herunter geht. Man kann den Wirkungsgrad hierbei bis auf 0,9 bringen.

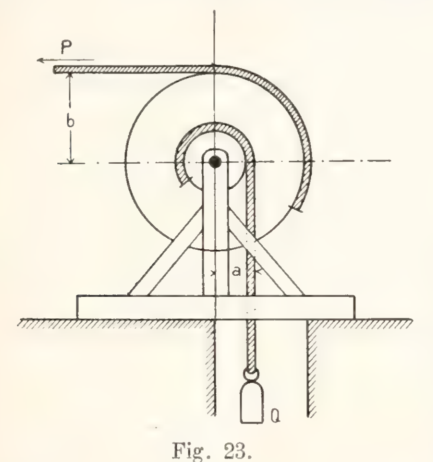


Fig. 23.

4. Maschinenelemente. Die maschinenentwerfende Technik zergliedert die Maschine in weitgehender Weise. Dies wird erforderlich, weil beim Entwerfen einer Maschine jeder einzelne Teil in erster Linie mit Rücksicht auf die in ihm tätige Kraftwirkung berechnet werden muß. Das Resultat der Zergliederung ist die Schaffung des Begriffes Maschinenelemente. Bei einigen Autoren wird hierfür das Wort Maschinenorgane gebraucht. Beide Begriffe unterscheiden sich wesentlich von dem oben eingeführten Begriff der elementaren Maschinen. Während bei letzteren wesentlich nur die Kinematik betrachtet wird, werden in der Lehre von den Maschinenelementen oder Maschinenorganen in erster Linie die Festigkeitsverhältnisse erörtert. Ferner begreift man unter Maschinenelementen oder Maschinenorganen eine sehr viel größere Zahl rudimentärer maschineller Einrichtungen, auf die die Bezeichnung elementare oder abgeleitete Maschine gar nicht passen würde. Selbstverständlich werden die oben besprochenen Arten abgeleiteter Maschinen auch unter den Maschinenelementen einer Berechnung hinsichtlich der Festigkeitsverhältnisse unterzogen.

α) Maschinenelemente zur Verbindung von Maschinenteilen. Zur Herstellung nicht lösbarer Verbindungen benutzt man den Niet (Fig. 24). Er besteht aus dem

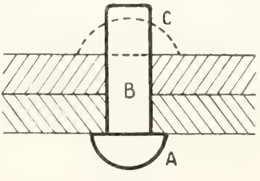


Fig. 24.

Setzkopf A und dem Schaft B. Nach der Durchführung durch das Nietloch wird durch Hämmern auf den hervorstehenden Teil des Schaftes der Schließkopf C hergestellt. Die durch Niete erzielbaren Verbindungen zeichnen sich durch Festigkeit und Wasser- und Dampfdichtigkeit aus. Sie sind deshalb das gegebene Mittel zur Herstellung von Dampfkesseln. Die Berechnung der Niete erfolgt auf Scherfestigkeit. Man denkt sich die Kraft, die die Nietverbindung zu zerstören sucht, auf die verbindenden Niete gleichmäßig verteilt und berechnet den Nietquerschnitt so, daß die Scherspannung pro qcm ein bestimmtes Maß, welches in der Nähe von etwa 800 kg pro qcm liegt, nicht überschreitet.

Eine wichtige Frage ist die, wie groß die Reibung zwischen den verbundenen Flächen, die durch die Vernietung scharf aufeinander gepreßt werden, wird. Bekanntlich wird in der weitaus größten Zahl der Fälle der Niet im glühenden Zustand eingezogen. Bei der Erkaltung zieht er sich zusammen, wodurch eine Pressung zwischen den vernieteten Teilen entsteht, die naturgemäß einen hohen Betrag erreichen wird. Durch Versuche hat man gefunden, daß der Reibungsbetrag in der Tat ein außerordentlich hoher ist, und daß der Widerstand, den die Reibung der Zerstörung der Nietverbindung entgegensetzt, bedeutend größer

sein kann als der Widerstand, den die Scherfestigkeit der Niete bietet. Man hat konstatiert, daß die Größe der Reibungskoeffizienten bei den großen hier in Frage kommenden Flächendrücken in der Nähe von 1 liegt. Diese Tatsachen sind besonders wichtig für die Beurteilung der bei Dampfkesselnietungen vorliegenden Verhältnisse.

Lösbare Verbindungen stellt man zunächst her vermittels der Schrauben (Fig. 25). Die

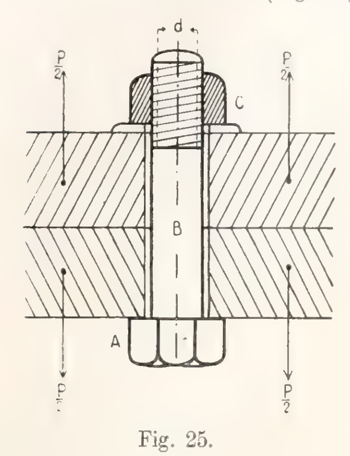


Fig. 25.

Schraube besteht aus Schraubenkopf A, Schaft B und Schraubenmutter C. Die Berechnung erfolgt in den meisten Fällen auf Zugfestigkeit. Man dimensioniert den kleinsten Durchmesser d des Schraubengewindes (Kerndurchmesser) so, daß die auf die Durchschnittseinheit entfallende Zugspannung $4P:\pi^2d$ ein bestimmtes Maß nicht überschreitet. Dieses Maß liegt zwischen 500 und 800 kg pro qcm.

Es gibt verschiedene Gewindearten, von denen das Whitworthsche das verbreitetste ist. Andere Gewindearten sind das flachgängige und das trapezförmige Gewinde, die besonders bei Schrauben sehr großen Durchmessers, die oft gedreht werden, angewendet werden. So sind z. B. die Schraubenspindeln, die das Hebewerk von Henrichenburg betätigen, flachgängige Schrauben von 20 cm Durchmesser.

Eine weitere oft angewendete lösbare Verbindung ist der Keil. Die Figur 26 zeigt die Wirksamkeit einer Keilverbindung zwischen den Teilen A und B. Die Berechnung des Keiles, besonders seiner Höhe h und seiner Stärke s, würde hier zu weit führen. Jedenfalls muß dafür gesorgt werden, daß der sogenannte Anzug des Keiles so klein ist, daß er unterhalb des Tangens des Keilwinkels α bleibt. Nur so ist die Keilverbindung durch die Reibung vor dem Selbstlösen gesichert.

β) Maschinenelemente der drehenden Bewegung. Zur Vermittelung drehender Bewegungen dienen in erster Linie die Achsen und Wellen, sowie die Räder. Zur Stützung der ersteren benutzt man die so-

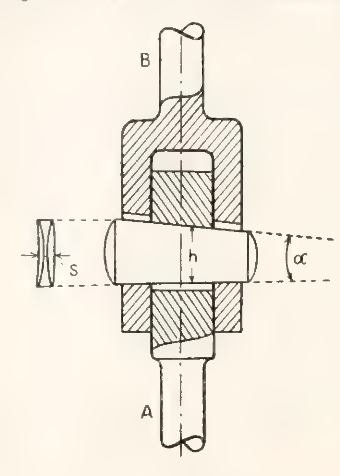


Fig. 26.

genannten Lager (Fig. 27), deren Berechnung von großer Wichtigkeit ist. Die wesentliche Größe, die auf die Abmessung des Lagers von Einfluß ist, ist der Lagerdruck, d. h. die Gesamtbelastung P, die von der Welle

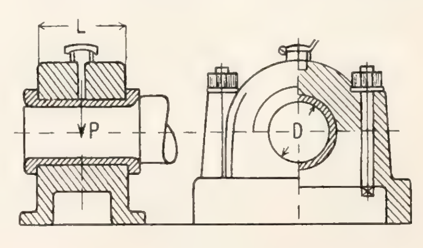


Fig. 27.

auf das Lager ausgeübt wird. Diese Belastung wird insofern einflußnehmend, als die auf die Flächeneinheit der Lagerschale entfallende Pressung $p = \frac{P}{L.D}$ ein bestimmtes Maß nicht überschreiten darf, wenn das Lager sich im Betriebe nicht unzulässig erwärmen soll. Die hier maßgebenden Pressungen sind je nach dem für das Lager und für den Lagerzapfen verwendeten Material verschieden. Im Mittel dürften 50 bis 100 kg qcm vorkommen. Um das Lager gegen unzulässige Erwärmung zu schützen, genügt die richtige Auswahl des Flächendruckes noch nicht, es muß auch dafür gesorgt werden, daß die unter allen Umständen durch die Reibung erzeugte Wärme abgeführt wird. Ist es nicht angängig, durch möglichste Verlängerung des Lagerzapfens die Wärmeabfuhr zu erhöhen, so muß zur

künstlichen Lagerkühlung mittels unter Druck zirkulierenden Oeles geschritten werden.

Die Festigkeitsbewegung der Achsen und Wellen ist abhängig von den Biegungs- und Torsionskräften, die durch sie übertragen werden. Solange eine Welle nur an zwei Punkten A und B gelagert ist (S. Fig. 28),

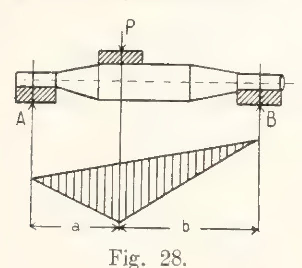


Fig. 28.

handelt es sich um ein statisch bestimmtes System, dessen Berechnung ohne weiteres durchführbar ist. Bei mehrfacher Lagerung kommt man in das Gebiet der statisch unbestimmten Probleme, auf deren Erörterung als zu weit führend hier nicht eingegangen werden kann.

Die Berechnung der auf den Achsen und Wellen sitzenden Räder, mögen es nun Zahnräder oder Riemen- oder Seilscheiben sein, Rollen oder Trommeln, hat auszugehen einerseits von den durch die Kraftübertragung in den Armen und den Radkränzen hervorgerufenen Biegungsspannungen, andererseits auf die durch die Zentrifugalkraft hervorgerufenen Beanspruchungen s. Fig. 29.

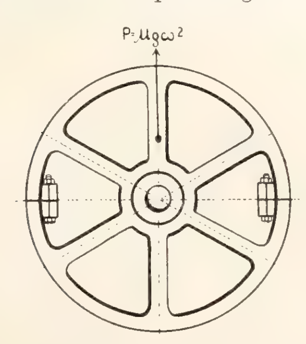


Fig. 29.

Die zur Vermittelung der Kraftübertragung der Räder dienenden Organe, Riemen Seile und Ketten haben in erster Linie den Anforderungen der Zugfestigkeit gegenüber den zu übertragenden Kräften zu genügen. In zweiter Linie hat man dafür zu sorgen, daß die Reibung zwischen ihnen und den Rädern das erforderliche Maß besitzt, um ein Gleiten im Betriebe zu verhindern.

γ. Maschinenelemente der hin- und hergehenden Bewegung. Das wichtigste Getriebe zur Uebertragung einer hin- und hergehenden Bewegung ist das Getriebe der Dampfmaschinen Fig. 30, bestehend

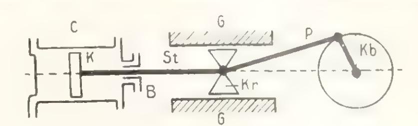


Fig. 30.

aus Zylinder C, Kolben K, Kolbenstange St, Stopfbüchsen B, Kreuzkopf Kr, Gradführung G, Pleulstange P, Kurbel Kb.

Von diesen einzelnen Teilen haben die Zylinder in erster Linie den im Innern wirkenden Dampfdruck auszuhalten. Die Kolben müssen dem Druck des Dampfes ebenfalls Widerstand leisten, daneben müssen sie dicht sein, d. h. sie müssen den Durchtritt des Dampfes zwischen ihnen und der Zylinderwand verhindern, wie das auch von den Stopfbüchsen verlangt wird. Die Kolbenstangen müssen den zu übertragenden hin- und hergehenden Knickkräften gewachsen sein, die Schuhe des Kreuzkopfes müssen so bemessen sein, daß ihre hin- und hergehende Bewegung in den Gradführungen ohne nachteilige Wärmeentwickelung gewährleistet ist. Die Schubstange muß zug- und knickfest sein und der Kurbelarm schließlich biegungs- und torsionsfest. Aus dieser Aufzählung geht hervor, welche vielseitigen Gesichtspunkte beim Entwurf der Maschinenteile der hin- und hergehenden Bewegung in Frage kommen, weshalb auf eine systematische Untersuchung hier verzichtet werden kann.

δ. Maschinenteile zur Aufnahme und Fortleitung von Flüssigkeiten. Hierher gehören die Kessel und die Röhren. Die Festigkeitsberechnung erfolgt in der Weise, daß man die Gesamtkraft des inneren Druckes pDL auf zwei diametral gegenüberliegende Wandungsquerschnitte verteilt denkt und diese sich so berechnet, daß die Summe der beiden Querschnitte den gesamten Innendruck aufzunehmen imstande ist, wobei man eine Zugfestigkeit k_z des Materials (Eisen vorausgesetzt) in Höhe von rund 800 kg/qcm in Ansatz bringt. Als Gleichung für die Berechnung der Wandstärke hat man bei gegebenem Innendurchmesser D und Innendruck p:

$$pDL = 2sk_zL$$

$$\text{oder } s = \frac{pD}{2k_z} \text{ (s. Fig. 31)}$$

ε. Sperr- und Bremswerke sowie Ventile. Unter diese Ueberschrift gehören sehr verschiedenartige Formen, deren Aufzählung über den Rahmen der vorliegenden Darstellung zweifellos hinausgehen würde. Die Figuren (resp. 32, 33, 34) müssen genügen,

um die Funktion eines Sperrwerkes, eines Bremswerkes und eines Ventils anzudeuten.

ζ) Regelnde Maschinenelemente. Zu den regelnden Maschinenteilen im engeren Sinne gehören eigentlich nur die Schwung-

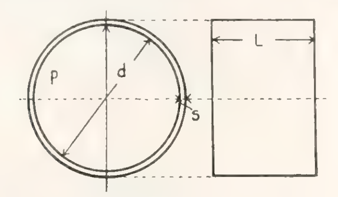


Fig. 31.

räder. Sie dienen dazu, Schwankungen der Umdrehungsgeschwindigkeit einer Maschine zu verhindern, indem sie bei wechselnder Kraftzufuhr Energie in Form von lebendiger Kraft in sich aufspeichern oder aber abgeben. Ihre wichtigste Rolle spielen sie bei

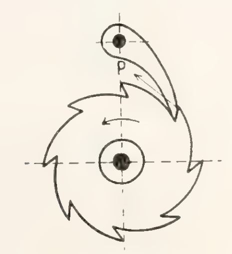


Fig. 32.

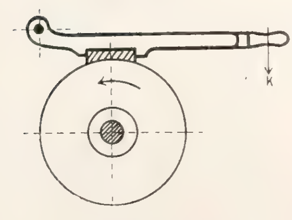
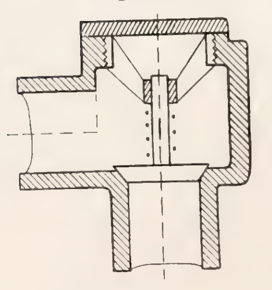
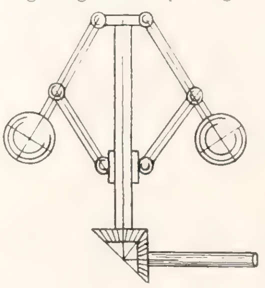


Fig. 33.


Fig. 34.

Kolbenkraftmaschinen, bei denen sie die innerhalb eines Kolbenspiels auftretenden Schwankungen des Antriebsfeldes der Maschine auszugleichen haben.

Den Schwungrädern stehen die Regulatoren im weiteren Sinne gegenüber, ihre Funktion ist eine weitergehende. Sie haben nicht die natürlichen Schwankungen der Energieaufnahme- und Abgabe zu kontrollieren, die innerhalb einer Maschinenperiode stattfinden, sondern sie haben dafür zu sorgen, daß äußere Einwirkungen auf den Energieaustausch der Maschine ohne Einfluß auf den Gang derselben bleibt. Die einfachste Form eines Regulators ist der Wattsche Schwung-Kugelregulator (s. Fig. 35). Seine


Fig. 35.

Wirkungsweise ist die, daß er, wenn infolge Verminderung der Belastung der Maschine deren Tourenzahl zu steigen beginnt, unter Einfluß der Zentrifugalkraft der Schwungkugeln das Dampfzufuhrventil der Maschine abstellt und so dafür sorgt, daß die Umlaufzahl innerhalb der vorgeschriebenen Grenzen bleibt.

Literatur. ***Weissbach,*** *Lehrbuch der Ingenieur- und Maschinentechnik.* — ***Bach,*** *Maschinenelemente.* — ***Hütte,*** *Taschenbuch des Ingenieurs.* — ***Reuleaux,*** *Der Konstrukteur.* — ***Grashof,*** *Theoretische Maschinenlehre.*

W. Hort.

Maß und Messen.

1. Beschreibende und messende Naturwissenschaft. 2. Qualität, Intensität, Quantität. 3. Nummern und Größen. 4. Einheiten und Zahlenwerte. 5. Fundamentalgrößen und Fundamentalsystem. 6. Die Dimensionen einer Größe. 7. Raum, Meter, Zentimeter. 8. Zeit, Tag, Sekunde. 9. Das Massensystem und das Gewichtssystem. 10. Gramm-Masse und Gramm-Gewicht. 11. Umrechnung. 12. Gauß'sches System. 13. Tafel der Dimensionen. 14. Messung von Größen; Sinnesorgane und Meßapparate 15. Beobachtungsfehler, Mittelwert und wahrscheinlicher Fehler; Systematische und zufällige Fehler. 16. Funktionsgrößen; Rechnerische und graphische Interpolation. 17. Kurvenscharen und Modelle. 18. Methode der kleinsten Quadrate.

1. Beschreibende und messende Naturwissenschaft. In früheren Zeiten pflegte man zwischen beschreibender Naturwissenschaft einerseits und exakter oder messender Naturwissenschaft andererseits zu unterscheiden und zu jenen die Mineralogie, Geo-

logie und Biologie, zu diesen die Astronomie, Physik und Chemie zu rechnen. Heute sieht man klarer und weiß, daß es sich hierbei nicht sowohl um einen Unterschied zwischen verschiedenen Zweigen der Naturwissenschaft handelt, als vielmehr um eine verschiedene Höhe der Stufen, die sie erklommen haben; und man kann mit Leichtigkeit aus beiden großen Gebieten Tatsachen angeben, die von dem einen oder anderen Typus sind. So ist die Tatsache, daß das Licht beim Uebergange aus Wasser in Luft gebrochen wird, rein qualitativen Charakters und doch der Physik angehörig; und die andere Tatsache, daß die Nervenleitung mit der Geschwindigkeit von 30 m in der Sekunde vor sich geht, von quantitativem Charakter, obwohl sie ins Gebiet der Biologie gehört. Die Unterstufe ist natürlich die qualitative Beschreibung, die Oberstufe die quantitative Messung; und das einzige, was fraglich bleibt, ist dies, ob es jemals gelingen wird, sämtliche Erscheinungen des Kosmos in das Gefüge quantitativer Erkenntnis einzuordnen. In bezug auf die Erscheinungen des Geistes wird es noch überwiegend bezweifelt, und selbst der schon ziemlich weit durchgeführte Versuch, die einfachsten psychischen Vorgänge quantitativ zu erfassen, begegnet immer noch vielfachem und, soweit es sich nicht um reine Raum- und Zeitbeziehungen handelt, teilweise nicht unberechtigtem Mißtrauen. Um so dringender erscheint es, das ganze Problem bis auf seine Wurzeln zurückzuverfolgen und auf gesicherten Fundamenten bis zu der Höhe aufzubauen, die es verträgt.

2. Qualität, Quantität, Intensität. Die unterste Stufe der Erkenntnis ist die rein qualitative. Hier werden Formen und Farben und zahllose andere Qualitäten unterschieden, und es werden die Veränderungen festgestellt, die diese Qualitäten im Laufe der Zeit erfahren. Dieses Bild würde jedoch äußerst unzulänglich bleiben, wenn man nicht zur Qualität die Quantität oder Intensität hinzunähme; ja, man kann, wenn auch nicht vom streng philosophischen, so doch vom naiven und praktischen Gesichtspunkte aus, geradezu die Quantität und die Intensität unter den Begriff der Qualität subsumieren. Ein grünes Blatt ist ein anderes wie ein rotes; ein glattrandiges ein anderes wie ein gezacktes; aber auch ein großes Blatt ist ein anderes wie ein kleines, und ein intensiv grünes ein anderes wie ein schwach grünes. Was die Qualität von der Quantität und Intensität scheidet, ist, daß sie nicht, wie diese beiden, einer Abstufung in einfacher, linearer Mannigfaltigkeit fähig ist; daß man zwar in bezug auf Quantität und Intensität ein Ding über das andere stellen kann, nicht aber in bezug auf Qualität. Ein Elefant ist größer als ein Hund; für eine grüne und eine rote Glasscheibe kann man irgendeinen Komparativ zunächst nicht bilden. Aber gerade hier stoßen wir auf eine der hauptsächlichsten Aufgaben exakter Naturforschung: alle Qualitäten, soweit irgend möglich, auf Quantitäten und Intensitäten zurückzuführen; bei den Spektralfarben ist das durch Vermittelung der Wellenlänge gelungen: grün ist kurzwelliger als rot; ebenso für Hunderte von Qualitäten; aber tausend andere Qualitäten harren noch dieser Analyse und werden zum Teil noch lange harren müssen.

3. Nummern und Größen. Die Charakterisierung von Qualitäten, Quantitäten und Intensitäten erfolgt auf der untersten Stufe durch eine Anzahl von Worten, wie grün und rot, groß und klein, hell und dunkel. Je mehr Abstufungen man macht, desto genauer, relativ genommen, wird das Verfahren. In der Musik z. B. kommt man mit den Bezeichnungen pianissimo, piano, mezzopiano, mezzoforte, forte, fortissimo schon recht weit, muß aber natürlich für alle weiteren Zwecke dem Ausführenden noch viel Freiheit in der Abstufung überlassen. Ein weiterer Schritt besteht darin, daß man an Stelle der Worte oder Wortzeichen, z. B. pp für pianissimo usw., Zahlen, richtiger gesagt, Ziffern oder Nummern setzt. Macht man eine derartige Angabe ohne besondere Hilfsmittel, nur mit den eigenen Sinnesorganen, so nennt man sie eine Schätzung. Man weiß, wie verschieden sie ausfällt, wenn sie von verschiedenen Personen ausgeht, und daß auch eine und dieselbe Person je nach den Umständen, unter denen sie selbst oder die zu schätzende Sache sich befindet, sehr verschieden schätzt, sei es, daß es sich um Strecken oder Zeiten, um Helligkeiten oder Temperaturen handelt. Man wird auf diese Weise meist nur dazu gelangen, eine Reihenfolge verschiedener Dinge aufzustellen und die Glieder dieser Reihe mit Nummern zu belegen. Beispiele bieten die Größenklassen der Fixsterne und die Härteskala von Mohs; in dieser belegt man den weichsten Körper mit der Nummer eins, den härtesten mit der Nummer zehn, und wählt dann typische Vertreter für die Zwischennummern. Es kann aber gar nicht scharf genug betont werden, daß dies nur Nummern und keine Zahlen sind, d. h. sie haben nur die Bedeutung, daß das Mineral mit der größeren Härtenummer härter ist als das mit der kleineren, nicht aber die weitere, daß ein Mineral mit der Härtenummer sechs doppelt so hart wäre wie ein solches mit der Härtenummer drei; über dieses Verhältnis läßt sich vielmehr auf diesem Wege nicht das mindeste, auch nicht mit

der rohesten Annäherung, aussagen; später hat sich durch wirkliche Messungen gezeigt, daß die Stufen der Härteskala ungeheuer verschieden sind. Natürlich kann man nachträglich noch Zwischenstufen einschieben und diese mit Brüchen oder Dezimalstellen bezeichnen; immer aber handelt es sich nur um eine Anordnung, nicht um eine Messung.

Zu einer wissenschaftlichen Höhe erhebt man sich erst, wenn man die Quantität oder die Intensität oder, indirekt, die Qualität durch mathematische Größen, d. h. durch benannte Zahlen ausdrückt. Dieser Prozeß ist stets eine Vergleichung zweier gleichartiger Dinge, von denen eines die Rolle des zu messenden, das andere die Rolle des Vergleichs- oder Bezugsdinges spielt. Für irgendeines der zu vergleichenden Dinge bleibt die Aufgabe offenbar unlösbar, alle menschliche Erkenntnis ist von relativem Charakter, und sie kann höchstens den Anschein von absolutem Charakter erhalten, indem man das Bezugsding zur Einheit macht, indem man ihm die Einheit der betreffenden Quantität beilegt. Den so skizzierten Prozeß nennt man eine Messung. Jede Messung ist relativ, und jede Messung darf als absolut bezeichnet werden, wenn das Messungsergebnis nicht mehr in die Form eines Vergleichs gebracht, sondern auf eine, wenn auch noch so willkürlich gewählte Einheit bezogen wird. Eine im wahren Sinne absolute Messung gibt es in keinem Falle und kann es, schon rein erkenntnistheoretisch, nicht geben; ein Satz, der besonders hervorgehoben werden muß, weil der üblich gewordene Ausdruck „absolutes Maßsystem" viel Verwirrung angerichtet hat.

Eine Messung setzt, wie gesagt, mathematische Größen voraus, d. h. Größen, die die vier Grundoperationen, und darauf hin auch die übrigen, vertragen. Wenn diese Voraussetzung nicht erfüllt ist, darf man nicht von einer Messung sprechen. Dabei ist es in den meisten Fällen wichtig, sich klar darüber zu werden, welches denn die durch die Messung gelieferte mathematische Größe ist; an dem Beispiel der Temperatur wird das deutlich werden. Wenn man Temperaturen in Celsiusgraden ausdrückt, so ist es sicherlich nicht die Temperatur selbst, die man als Größe bestimmt; denn niemand wird behaupten wollen, daß 20° das Doppelte von 10° oder daß 10° unendlichmal so viel wie 0° sei. Andererseits hat man doch das bestimmte Gefühl, daß man mit dem Celsiusthermometer irgend etwas exakt mißt, und dieses Gefühl ist auch ganz richtig; die Größe aber, die man mißt, ist nicht die Temperatur, sondern das sind die Temperaturdifferenzen in irgend zwei Fällen; in der Tat ist die Temperaturdifferenz zweier Körper von 30 und 40° ebenso groß wie die zweier Körper von 10 und 20°; und die Temperaturdifferenz zweier Körper von 10 und 30° ist doppelt so groß wie die zweier Körper von 10 und 20°. Die Erklärung ist naheliegend: man hat hier eine Skala, deren Grade, die früheren Stufen, zwar mathematisch gleich sind, deren Nullpunkt aber willkürlich gewählt ist und nicht die wirkliche Bedeutung eines Nullpunktes der betreffenden Quantität besitzt. Das tritt erst ein, wenn man die Temperaturen vom absoluten Nullpunkte aus rechnet, d. h. von dem Punkte aus, wo der Energieinhalt des Körpers null ist; und die so gemessene Temperatur, bei der die Grade der Celsiusskala getrost beibehalten werden dürfen, ist eine wirkliche mathematische Größe; daß in der Wahl des absoluten Nullpunktes eine Hypothese hinsichtlich der Natur der Wärme und der Temperatur enthalten ist, kommt hier nicht näher in Betracht.

4. Einheiten und Zahlenwerte. Das Ergebnis einer Messung drückt sich aus erstens durch eine Zahl, die angibt, wievielmal, einschließlich der Bruchteile, die vorliegende Größe in der Maßgröße enthalten ist; und zweitens durch ein Beiwort, das den Charakter der Größenklasse angibt, zu der sowohl der gemessene wie der Maßkörper gehören; also beispielsweise: 5 m, 10 Ampere, oder 0,36 Erg.

Derartiger Charaktere gibt es nun außerordentlich viele; und um in diese ungeheure Mannigfaltigkeit Ordnung zu bringen und eine leichtere Uebersicht zu gewinnen, legt man sich die Frage vor, ob alle diese Charaktere voneinander unabhängig sind, oder ob es vielleicht möglich ist, einige von ihnen auf andere zurückzuführen und durch sie auszudrücken. Bei manchen ist das ohne jede Schwierigkeit zu machen, so bei der Fläche, die man auf die zweite Potenz, und bei dem Volumen, das man auf die dritte Potenz der Streckeneinheit zurückführen kann; ferner bei der Geschwindigkeit, die man als das Verhältnis der zurückgelegten Strecke zu der dazu erforderten Zeit ansehen kann, der Beschleunigung und vielem anderen. Man sagt also: die Strecke ist eindimensional, die Fläche zweidimensional, das Volumen dreidimensional. Die Bezeichnung „Dimension" überträgt man auch auf andere Charaktere, für die sie dann freilich keine anschauliche Bedeutung mehr besitzt, sondern nur noch rein begrifflich die betreffende Charakteristik bezeichnet. Man spricht also von der Zeitdimension, der Massendimension usw. Die oben angeführte Geschwindigkeit enthält z. B. die Strecke in der ersten Potenz oder Dimension, die Zeit aber, weil sie im Nenner des Bruches

steht, der sie definiert, in der minus ersten Dimension. Die lebendige Kraft, besser gesagt, die kinetische Energie, enthält die Masse in der ersten und die Geschwindigkeit in der zweiten Dimension, nämlich ihr Quadrat, oder, weiter reduziert, die Masse in der ersten, die Strecke in der zweiten und die Zeit in der minus zweiten Dimension.

Je weiter man in dieser Analyse der Charaktere fortschreitet, desto tiefer gelangt man freilich in das Gebiet mehr oder weniger unsicherer Hypothesen. Wenn man z. B. die Temperatur als kinetische Energie der Teilchen auffaßt und somit auf die Charaktere der Masse und der Geschwindigkeit zurückführt, so muß man erst zeigen, daß dieses Bild durch die Tatsachen gerechtfertigt wird; und dann braucht es immer noch nicht das einzige mögliche Bild zu sein. Schließlich zeigt sich, daß man die Zahl der voneinander unabhängigen Charaktere außerordentlich stark einengen kann und daß man jedenfalls sehr gut mit dreien auskommt; man kann sie das Fundamentaltripel nennen und die ganze Fundierung der exakten Naturlehre als trialistisch.

5. Fundamentalgrößen und Fundamentalsystem. Es fragt sich nun, welche drei Charaktere man als Fundamentalgrößen wählen solle; und hierauf kann es eine zwingende Antwort nicht geben, nur eine oder die andere, die der Zweckmäßigkeit mehr oder weniger entspricht. Indessen wird doch hinsichtlich zweier dieser Größen kein Zweifel obwalten dürfen, das ist die Strecke oder Länge (L) als elementare Raumgröße und die Zeit (T) als einzige Zeitgröße; denn diese beiden Vertreter unserer Anschauungsformen kann man in einem Fundamentalsystem auf keinen Fall missen. Was hingegen die dritte Größe betrifft, so hängt hier die Entscheidung vom Stande unserer Naturerkenntnis und der Auffassung, die wir uns von ihr bilden, also schließlich auch von dem Geschmacke des einzelnen Naturforschers ab. In früheren Zeiten stand die Kraft (K) im Vordergrunde und bildete daher auch die dritte Fundamentalgröße — eine Rolle, die sie sich wenigstens in der Praxis noch zum großen Teile bis auf den heutigen Tag bewahrt hat. Dann kam die Masse an die Reihe (M), und sie hat in der Wissenschaft unserer Zeit den nahezu unbestrittenen Platz als dritte Größe im Fundamentalsystem. Aber schon mehrt sich fortwährend die Zahl derer, die diesen immerhin speziellen und an den Grenzen verschwimmenden Begriff durch den allgemeineren und klareren Begriff der Energie (E) ersetzt sehen wollen und hauptsächlich nur deshalb bis jetzt nicht durchgedrungen sind, weil dieser Begriff, zunächst wenigstens, ein gewisses Umdenken nach der Seite größerer Abstraktion erfordert, aus der sich dann freilich sehr bald eine um so höhere Anschauung herausbilden würde. Man kann die drei somit skizzierten Fundamentalsysteme als das Kraftsystem, das Massesystem und das Energiesystem bezeichnen.

6. Die Dimensionen einer Größe. Sind einmal die Grundbegriffe und für jeden von ihnen eine Einheit festgesetzt, so ist es nur noch eine Spezialaufgabe, jeden anderen Begriff durch jene auszudrücken und damit das aufzustellen, was man seine Dimensionsformel nennt; in jedem der drei obigen Systeme wird natürlich die Dimensionsformel einer und derselben Größe anders ausfallen. So ist, um nur ein Beispiel zu geben, die Kraft im Kraftsystem, in dem sie ja selbst eine Fundamentalgröße ist, einfach durch die Formel [K] charakterisiert; im Massensystem ist sie das Produkt einer Masse in die dieser Masse durch sie erteilte Beschleunigung, also, da die Beschleunigung ihrerseits eine zweimal durch die Zeit dividierte Strecke ist, durch die Formel $[LT^{-2}M]$ charakterisiert; im Energiesystem endlich ist die Kraft das Verhältnis der energetischen Leistung, also der Arbeit, zu der Strecke, auf der die Arbeit geleistet wird (Arbeit für die Streckeneinheit), die Formel lautet somit $[L^{-1}E]$.

Auf das energetische System wollen wir hier nicht weiter eingehen; dagegen müssen wir die beiden anderen noch etwas näher miteinander vergleichen und bei dieser Gelegenheit auch die Einheiten festsetzen, die wir für die Grundgrößen wählen wollen. Da haben wir es also zunächst mit dem Raummaße zu tun, und das macht es nötig, daß wir noch einmal auf die erkenntnistheoretischen Grundlagen zurückgehen.

7. Raum, Meter, Zentimeter. Der Raum ist die Form, in der sich uns die Außenwelt darstellt; noch exakter gesagt: mein Raum ist die Form, in der sich mir die Außenwelt darstellt. Welche Form das ist, das hängt natürlich von meiner Beschaffenheit und meinem Orte ab; strenger ausgedrückt, denn einen Ort habe ich ja noch nicht: mein Ort ist das Zentrum meines Raumes, der Raum mit allen seinen Mannigfaltigkeiten ist eine Projektion nach außen, die ich von meinen Netzhautbildern oder, wenn ich andere Sinnesorgane benutze, von deren Zentren aus entwerfe. Dieser Raum ist daher seinem Wesen nach perspektivisch, und die Schätzung seiner quantitativen Verhältnisse, die ich vornehme, wird ebenfalls rein perspektivisch, rein subjektiv sein, sie wird für jeden anderen Menschen anders ausfallen wie für mich. Es handelt sich also darum, den Raum sozusagen zu ob-

jektivieren; und das kann jedenfalls nur durch systematischen Wechsel des Zentrums, also meines Standpunktes, geschehen, wozu dann noch zweitens die Emanzipation von meiner besonderen Körperbeschaffenheit kommen wird. Bei dieser Wanderung durch den Raum muß ich daher, wenn ich Messungen ausführen will, den Maßkörper, in diesem Falle den Maßstab oder ein Flächen- oder Volumenmaß mitnehmen und dabei voraussetzen, daß er sich bei der Wanderung selbst nicht verändert. Man hat sich gewöhnt, in dieses Verfahren ein so unbegrenztes Vertrauen zu setzen, daß man erstaunt ist, wenn man zum ersten Male hört, daß das Verfahren auf bestimmten Voraussetzungen beruht, deren Erfüllung erst nachzuweisen ist. Um das in Kürze verständlich zu machen — näheres findet man in einem berühmten Aufsatze von Helmholtz und sonst vielfach — sei folgendes bemerkt. Mit unserem dreidimensionalen Anschauungsvermögen können wir uns beliebig viele zweidimensionale Gebilde, d. h. Flächen, vorstellen: die Ebene, die Kugelfläche, die Eifläche usw., und auf jeder dieser Flächen gelten andere geometrische, also andere Maßgesetze, z. B. hinsichtlich der Natur der kürzesten Linie zwischen zwei Punkten (in der Ebene die gerade Linie, auf der Kugel ein Bogen eines größten Kugelkreises), hinsichtlich der Parallellinien, hinsichtlich der Summe der Winkel in einem Dreiecke usw. Das hat nun zur Folge, daß die Grundlagen des Meßverfahrens auf solchen Flächen ganz verschieden sind: auf der Kugelfläche ändert sich z. B. der Abstand zwischen entsprechenden Punkten zweier Meridiane fortwährend, wenn man vom Aequator zum Pole fortschreitet; in der Eifläche ist der räumlich betrachtete Abstand der Endpunkte eines gespannten Fadens ein anderer auf der spitzen wie auf der stumpfen Seite. Gehen wir nun von Flächen, wo diese Komplikationen nichts schaden, da wir sie anschauen und darum berücksichtigen können, zu Räumen über, so müssen wir uns, was die Anschauung betrifft, mit dem einzigen Raume bescheiden, den wir empirisch kennen; aber abstrakt können wir uns den Begriff des ebenen, des sphärischen, des Eiraumes sehr wohl bilden und werden dann vor die Frage gestellt: was für ein Raum ist denn eigentlich unser empirischer Raum? Das ist deshalb für unser Thema prinzipiell wichtig, weil nur, wenn er ein „ebener“ Raum ist, unsere Messungen in jeder Hinsicht einwandfrei werden; schon für den sphärischen Raum fallen gewisse, und für den Eiraum noch weitere Voraussetzungen fort. Nun hat sich allerdings bei allen astronomischen Messungen — irdische kommen als zu kleinlich nicht in Frage — gezeigt, daß die Konsequenzen der ebenen Natur unseres Raumes stimmen, und noch kürzlich ist an der Hand gewisser Beobachtungen festgestellt worden, daß, falls unser Raum sphärisch sein sollte, doch seine Krümmung ganz außerordentlich schwach sein müßte. Aber das ändert nichts an der prinzipiellen, auf diese Weise gewonnenen Erkenntnis, daß die Grundlagen für das übliche Meßverfahren in unserem Raume nur praktisch vollkommen, prinzipiell aber nur mit einem gewissen, begrenzten Grade der Genauigkeit gesichert sind.

Was nun die Einheit der Länge betrifft, so ist es im Grunde ganz gleichgültig, wie man sie wählt und woher man sie nimmt. Früher entlehnte man sie dem menschlichen Körper und nannte sie Fuß; dann, als die Verwirrung der verschiedenen Fußmaße zu groß geworden war und die wachsende Internationalität Gleichförmigkeit verlangte, nahm man einen allen Menschen gemeinsamen Körper, den Erdkörper, der ihnen als Wohnsitz dient, zu Hilfe und definierte das Meter als den zehnmillionsten Teil des vom Aequator zum Pole gemessenen Erdquadranten. Später hat sich herausgestellt, daß der hiernach fabrizierte Normalmeterstab gar nicht genau der zehnmillionste Teil des Erdquadranten ist, nicht sowohl, weil er sich verändert hätte, das wird er zweifellos, aber nur in ganz winzigem Maße getan haben, als vielmehr, weil man inzwischen den Erdquadranten genauer ausgemessen hat. Man ist so vernünftig gewesen, nun nicht wieder einen neuen Maßstab anzufertigen, sondern die Beziehung zur Erde fallen zu lassen und zu sagen: Das Meter ist eine Länge, genau gleich der Länge des in Breteuil bei Paris aufbewahrten Normalmaßstabes, von dem übrigens an vielen Orten Kopien existieren (vgl. den Artikel „Längenmessung“). Man ersieht aus dieser Geschichte der Längeneinheit recht deutlich, was es mit dem sog. absoluten Charakter eines Maßsystems auf sich hat. Uebrigens ist man aus Gründen der Zweckmäßigkeit nicht beim Meter stehen geblieben, sondern zu seinem hundertsten Teile, dem Zentimeter, geschrieben cm, übergegangen, und dieses ist jetzt als Längeneinheit in der Wissenschaft und dem praktischen Leben fast aller zivilisierter Länder anerkannt und im Gebrauch.

Daß mit dem Normalmeter die Wünsche der Wissenschaft nicht restlos erfüllt sind, leuchtet ein; denn der Pariser Maßstab kann durch eine Katastrophe oder auch allmählich im Laufe langer Zeiten Schaden erleiden oder gar verloren gehen; die natürlichen Veränderungsprozesse werden zwar,

dank dem vorzüglichen Material und der sorgfältigen Aufbewahrung, nur sehr langsam von statten gehen, aber doch nicht ganz ausbleiben. Für die feinsten Zwecke der Wissenschaft besteht daher der Wunsch, ein Maß zu besitzen, auf das als unveränderlich und jederzeit ohne größere Schwierigkeit reproduzierbar man bauen kann. Unter den sich hier bietenden Möglichkeiten steht eine voran, die von Michelson zu einem konkreten Vorschlage ausgearbeitet worden ist: als Längennormale soll die Wellenlänge (λ) einer bestimmten Spektrallinie eines betimmten, in Dampfform benutzten Stoffes dienen, und zwar eine von drei Linien des Cadmiums, die, wie man sieht, sehr genau ausgemessen sind und folgende Beziehungen ergeben ($\mu = 0{,}0001$ cm):

λ (rot) = 0,64 384 722 μ,
λ (grün) = 0,51 858 240 μ,
λ (blau) = 0,47 999 107 μ,

oder umgekehrt

1 cm = 15 531,635 λ (rot),
1 cm = 19 662,497 λ (grün),
1 cm = 20 833,721 λ (blau);

nachdem diese Beziehung zwischen cm und λ einmal festgelegt ist, kann man das cm ausschalten und Größen, die man für alle Zeiten sicher charakterisieren will, soweit das Cadmium noch existiert und noch unverändert geblieben ist, direkt auf eines dieser λ beziehen.

8. Zeit, Tag, Sekunde. Wir kommen nun zum zweiten Fundamentalbegriff, zur Zeit. Da diese unsere innere Anschauungsform ist, müßten wir hier auch innere, d. h. psychische Grundlagen für die Messung nehmen; es zeigt sich aber, daß jede direkte Zeitschätzung außerordentlich unsicher und in hohem Maße von dem subjektiven Befinden und von den äußeren Umständen des betreffenden Zeitabschnittes, ob leer oder gefüllt, gegenwärtig oder vergangen usw., abhängig ist, und daß es auf diesem Wege ausgeschlossen ist, zu einem Zeitmaß zu gelangen. Es bleibt somit nichts übrig, als einen indirekten Weg einzuschlagen und äußere, d. h. räumlich-zeitliche Vorgänge, heranzuziehen. Natürlich wird man sich da wieder nach einem Vorgange umsehen, der die Garantie für möglichste Konstanz und Unveränderlichkeit bietet. Man hat, wie man weiß, schon von Alters her die Achsendrehung der Erde gewählt und nennt die betreffende Zeitstrecke einen Tag. Daß der Tag nicht absolut konstant bleiben kann, ergibt sich aus einer Reihe von Betrachtungen, von denen hier nur folgende angeführt seien: erstens muß der Tag wegen der mit der Abkühlung verknüpften Zusammenziehung der Erde allmählich verkürzt werden; zweitens muß er wegen der durch die Meteorfälle gesteigerten Erdmasse allmählich verlängert werden; und drittens, das ist der wichtigste Faktor, muß er wegen der bei der Achsendrehung der Erde sich geltend machenden Flutreibung, d. h. wegen des Nachbleibens der flüssigen Erdhülle gegenüber den festen Massen, verlängert werden. Rechnungen über die Größe dieser Einflüsse sind sehr unsicher; man tut daher besser, sich nach erfahrungsmäßigen Belegen umzusehen. Da zeigt nun allerdings die Gesamtheit der astronomischen Beobachtungen der 4000 jährigen Kulturzeit der Menschheit, insbesondere der Vergleich der Angaben über Finsternisse, daß sich der Tag von heute auf morgen sicherlich nicht um den millionsten Teil einer Sekunde ändert, wahrscheinlich auch nicht um den hundertmillionsten Teil der Sekunde; der einzige Weltkörper, der eine gewisse Unregelmäßigkeit der Tageslänge erschließen läßt, ist unser Mond; indessen handelt es sich auch hier um so kleine Beträge, daß man jedenfalls für Zeiträume von Jahrhunderten und wohl auch Jahrtausenden darauf keine Rücksicht zu nehmen braucht.

Mit der Festsetzung des Tages als Zeiteinheit ist es freilich noch nicht getan, weil dieser Begriff nicht eindeutig ist. Man kann darunter die Zeit verstehen und tut dies auch im praktischen Leben, die vom heutigen bis zum morgigen Durchgange der Sonne durch den Meridian vergeht; man nennt das einen Sonnentag. In den verschiedenen Jahreszeiten ist er verschieden lang, weil er offenbar von der Fortbewegung der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne beeinflußt wird und diese Fortbewegung wechselnde Geschwindigkeit hat. Man muß daher als Grundlage nicht den Sonnentag, sondern den Sterntag nehmen, wobei es gleichgültig ist, welchen Fixstern man benutzt, weil sie alle genügend weit von uns entfernt sind, um jeden Einfluß von Erdbewegung verschwinden zu lassen. Der Sterntag unterscheidet sich vom mittleren Sonnentage natürlich genau um so viel, daß im Laufe des Jahres eine Differenz von einem Tage entsteht, damit ist der mittlere Sonnentag ebenfalls exakt festgelegt, und man kann nun in bequemer Weise zur eigentlichen Zeiteinheit, der Sekunde (sec) übergehen, indem man vom mittleren Sonnentag den $24 \times 60 \times 60$. Teil, also den 86 400. Teil nimmt. Mit wirklicher Exaktheit kann man die Sekunde immer wieder nur auf astronomischem Wege reproduzieren; sehr angenähert aber auch durch irdische Vergleichungen, insbesondere mit Hilfe des Sekundenpendels, das, wenn es vom Typus eines einfachen Pendels ist und im Meeresspiegel unter 45° Breite aufgestellt ist, genau eine Länge von 99,0918 cm haben

muß, während für irgendeine Breite b und Höhe h die Formel gilt

$$l = 99{,}0918 - 0{,}2361 \cos 2b - 0{,}000031\ h.$$

Auch mit Hilfe der Normal-Stimmgabeln kann man die Zeiteinheit bei der nötigen Vorsicht mit großer Genauigkeit feststellen.

9. Das Massensystem und das Gewichtssystem. Damit sind die beiden ersten Fundamentalgrößen erledigt. Die dritte kann, wie gesagt, entweder die Masse oder die Kraft sein. Um einzusehen, wie sich diese beiden Möglichkeiten zueinander verhalten, muß man sich an die Entwickelungsgeschichte der klassischen Mechanik erinnern. Direkt zur Beobachtung kommt die Bewegung der Körper, ihr erstes Charakteristikum ist die Geschwindigkeit, ihr zweites und höheres, weil allgemeineres, die Beschleunigung. Diese Beschleunigung faßt man, um das Kausalitätsbedürfnis wenigstens äußerlich zu befriedigen, als eine Wirkung auf, und die Ursache nennt man Kraft. Solange es sich um einen einzigen Körper handelt, ist die Kraft der Quantität nach mit der Beschleunigung identisch (causa aequat effectum); eine Beziehung, die sich jedoch nicht mehr aufrecht erhalten läßt, wenn es sich um verschiedene Körper handelt. Denn diese nehmen erfahrungsgemäß auch unter gleichen Umständen verschiedene Beschleunigungen an, ja, sie erteilen sich, wenn sie miteinander in Wechselwirkung treten, verschiedene Beschleunigungen. Um trotzdem zu erreichen, daß die Kräfte, die sie aufeinander ausüben, einander entgegengesetzt gleich seien, muß man jede der beiden Beschleunigungen mit einem Faktor multiplizieren, und diesen Faktor nennt man die Masse; für irgendeinen Körper kann sie willkürlich angenommen werden, für alle anderen bestimmt sie sich dann nach dem obigen Prinzip, gemäß den Formeln

$$K = M.B;\ M = \frac{K}{B};\ B = \frac{K}{M}.$$

Wie die letzte von diesen Formeln zeigt, wird auf diese Weise die empirische Beschleunigung dargestellt als ein Verhältnis, dessen Zähler die Kraft, dessen Nenner die Masse ist; die Beschleunigung fällt, infolge des Eingreifens der Masse, kleiner aus als die erzeugende Kraft; die Masse ist der Widerstand gegen Bewegung.

Die so definierte Masse ist es nun, die im Massesystem als dritte Fundamentalgröße dient; um sie in einem bestimmten Falle prinzipiell festzulegen, müßte man den Körper, dem sie eigen ist, mit einem anderen, dem man die Masse eins zuschreibt, in Wechselwirkung treten lassen und die Beschleunigungen ermitteln, die sie sich gegenseitig erteilen — ein Verfahren, das in der Astronomie tatsächlich eine Rolle spielt, wo es sich um die Massen der untergeordneten gegenüber denen der übergeordneten Himmelskörper handelt. Indirekt kann man aber die Bestimmung viel bequemer ausführen, indem man, in einem Felde, in dem die Beschleunigung einen ein für allemal gegebenen Wert hat, z. B. im Schwerefelde der Erde, die Kraft K bestimmt, mit der der Körper zur Erde gezogen wird, eine Größe, die man bekanntlich sein Gewicht nennt; man braucht dann nur mit jener Beschleunigung, in diesem Falle mit 981 cm/sec^2, zu dividieren, um gemäß der zweiten der obigen Formeln die Masse des Körpers zu erhalten.

Natürlich kann man sich auch anders entscheiden und das Gewicht selbst, also eine Art von Kraft, zur Grundgröße wählen, womit man eben zum Kraftsystem gelangt. Ein prinzipieller Grund für die eine oder andere Entscheidung ist nicht vorhanden, da nach der obigen Betrachtung ebensogut die Kraft aus der Masse als die Masse aus der Kraft definiert werden kann. Der einzige Unterschied, jedoch mehr einer des Gefühls, ist der, daß wir uns gewöhnt haben, die Masse als etwas Konkretes, als den Inhalt eines Körpers an „Materie" aufzufassen, die Kraft aber als etwas Abstraktes. Wie hinfällig das ist, geht am besten aus der Tatsache hervor, daß gerade die Männer der Praxis das Kraftsystem, speziell das Gewichtssystem, eingeführt haben, und daß erst später die Männer der Wissenschaft die Forderung des Massesystems erhoben haben.

10. Gramm-Masse und Gramm-Gewicht. Die Existenz zweier Maßsysteme, die nebeneinander bestehen, ist gewiß unzweckmäßig, aber im Grunde nicht gar so schlimm, da man doch stets in der Lage ist, anzugeben, welches man meint. Was aber wirklich schlimm ist, und was geradezu Verwirrung anrichten muß, das ist der Umstand, daß man für die beiden Maßeinheiten, also für die Einheit der Masse und die Einheit des Gewichts — zwei prinzipiell und tatsächlich verschiedene Dinge — denselben Namen benutzt, indem man das eine wie das andere ein Gramm nennt. Als Masseneinheit ist das Gramm die Masse des Wassers, das bei 4^0 ein Kubikzentimeter ausfüllt oder auch die Masse des Metallstücks, das auf Grund dieser Definition hergestellt wurde und in Paris aufbewahrt wird. Als Gewichtseinheit ist es das Gewicht eben desselben Körpers, also im Massesystem das 981-fache jener Größe, d. h. 981 g; im Gewichtssystem heißt nun aber diese Größe wieder 1 g. Dabei ist nicht einmal diese Verhältniszahl stets dieselbe, da, wie man weiß, die

Beschleunigung durch die Schwere in verschiedenen geographischen Breiten und in verschiedenen Höhen über dem Meere etwas verschieden ist; im Massesystem wird also die Gewichtseinheit, im Gewichtssystem die Masseneinheit vom Orte abhängig. Jedenfalls tut man gut, in allen Fällen, wo Deutlichkeit erwünscht ist, die beiden Begriffe voneinander zu unterscheiden, indem man von Gramm-Masse oder von Gramm-Gewicht spricht oder, in der abgekürzten Schreibweise, das Gramm-Masse mit g oder gr oder G, das Gramm-Gewicht aber etwa mit g* oder gr* oder G* bezeichnet.

11. Umrechnung. In der modernen Wissenschaft wird, wie gesagt, fast allgemein das Massesystem benutzt, und zwar mit den Einheiten des Zentimeters, der Sekunde und des Gramms. Indem man diese Größen mit ihren Anfangsbuchstaben bezeichnet und alphabetisch, nicht erkenntnistheoretisch, ordnet, gelangt man zu dem üblichen Namen des Systems als des C-G-S-Systems.

Im praktischen Maßsysteme andererseits wird gewöhnlich statt des cm das Meter und statt des g* das Kilogrammgewicht, also das kg* benutzt. Wie man von dem einen zum anderen übergeht, sei an dem Beispiel der Arbeit erläutert. Ihre Einheit ist praktisch das Meterkilogramm, d. h. die Arbeit, die geleistet wird, wenn im Schwerefelde der Erde 1 kg um 1 m gehoben wird. Die absolute Einheit der Arbeit ist dagegen jene, die geleistet wird, wenn im Erdfelde 1 mg um 1 cm oder in einem Felde von der Schwerebeschleunigung eins 1 g um 1 cm gehoben wird; diese Einheit heißt Erg. Dieses ist zunächst wegen der cm-Einheit statt der m-Einheit 100 mal so klein, dann wegen der g*-Einheit statt der kg*-Einheit 1000 mal so klein und endlich wegen der g-Einheit statt der g*-Einheit 981 mal so klein; ein Meterkilogramm ist also gleich 98,1 Millionen Erg oder gleich 98,1 Megaerg. Geht man zur Arbeit für die Zeiteinheit über, also zum Effekt oder der Leistungsstärke, so rechnet man praktisch mit der „Pferdekraft“, wissenschaftlich aber mit dem Sekundenerg oder, da dies eine äußerst kleine Größe ist, mit dem 10 milliardenfachen, dem Kilowatt; das Verhältnis beider Größen ist dann: 1 HP oder 1 PS (Horse-power oder Pferdestärke) ist gleich 0,736 Kilowatt, d. h. rund $^3/_4$ Kilowatt.

12. Gaußisches System. Uebrigens gibt es noch eine weitere Möglichkeit, die zuerst von Gauß erkannt worden ist, praktisch aber keine Rolle, wenigstens für jetzt, spielt, und daher nur kurz erwähnt werden möge. Außer durch die Beschleunigung kann die Kraft auch noch auf eine andere Weise eingeführt werden, nämlich vermöge des Newtonschen Gravitationsgesetzes, wonach die Kraft gleich dem Produkt der wirkenden Massen, dividiert durch das Quadrat ihres Abstandes, ist; hier kommen also nur die Größen Strecke und Masse vor, und man gelangt zu einem neuen Kraftmaße, das man das Gravitationsmaß nennen kann; es ist von dem üblichen Kraftmaß völlig verschieden. Will man trotzdem beide Kraftmaße in Einklang bringen, so muß man oder kann man — denn das ist offenbar eine Vereinfachung unseres Fundamentalsystems — durch Gleichsetzung der beiden Kraftformeln eine der drei Grundgrößen durch die beiden anderen ausdrücken, z. B. die Masse durch Zeit und Strecke, und es bleiben dann nur noch zwei Fundamentalgrößen übrig. Die letzte Möglichkeit, auch von diesen beiden noch die eine durch die andere auszudrücken und damit zu einem formalen Monismus zu gelangen, kann hier nicht weiter verfolgt werden.

13. Tafel der Dimensionen. Zum Schlusse dieses prinzipiellen Teiles seien die Dimensionen einiger mechanischer Größen im C-G-S Systeme angegeben; unter jedem der drei Zeichen L, T, M (Länge, Zeit, Masse) ist angegeben, in welcher Dimension, d. h. Potenz, die Fundamentalgröße in der betreffenden Größe vorkommt.

Größe	L	T	M
Strecke	1	0	0
Fläche	2	0	0
Volumen	3	0	0
Winkel	0	0	0
Zeit	0	1	0
Geschwindigkeit	1	—1	0
Beschleunigung	1	—2	0
Winkelgeschwindigkeit	0	—1	0
Winkelbeschleunigung	0	—2	0
Masse	0	0	1
Dichte	—3	0	1
Volum der Masseneinheit	3	0	—1
Impuls	1	—1	1
Kraft	1	—2	1
Gewicht	1	—2	1
Spezifisches Gewicht	—2	—2	1
Bewegungsgröße	1	—1	1
Drehungsmoment	2	—2	1
Trägheitsmoment	2	0	1
Druck	—1	—2	1
Volum der Gewichtseinh.	2	2	—1
Potential	2	—2	1
Arbeit, Energie	2	—2	1
Effekt (Leistung)	2	—3	1
Temperatur	2	—2	0
Entropie	0	0	1

14. Messung von Größen, Sinnesorgane und Meßapparate. Wir kommen

nun zum zweiten Teile unserer Betrachtungen, der wirklichen Ausführung von Messungen. Indessen kann es sich in diesem Artikel auch in dieser Hinsicht nur um das Allgemeine dieser Aufgabe handeln, da der Messung jeder einzelnen Größe besondre Artikel gewidmet sind (vgl. die Artikel „Längenmessung", „Massenmessungen" „Zeitmessung").

Messungen können wir naturgemäß einzig und allein mit Hilfe unserer Sinnesorgane ausführen; und von diesen kommen Geruch und Geschmack gar nicht, der Tastsinn fast gar nicht, das Ohr nur in besonderen Fällen, in denen es sich allerdings zum Teil zu besonderen Leistungen erhebt, in Betracht. Bleibt also das Auge übrig, und dieses ist in der Tat unser Meßorgan kat exochén. Ferner ist zu unterscheiden zwischen Messungen unmittelbar mit den Sinnesorganen, solchen, zu denen wir gewisse Vorrichtungen zur Unterstützung des Sinnesorgans zu Hilfe nehmen und solchen, wo diese Vorrichtungen schließlich die Hauptrolle spielen. Die Sinnesorgane für sich leisten im allgemeinen nicht sonderlich viel; in besonderen Fällen aber können sie sich zu großer Feinheit erheben: so z. B. das Auge, wo es gilt, einen rechten Winkel festzustellen, oder das Ohr, wo der Einklang oder das Oktavenverhältnis zwischen zwei Tönen festzustellen ist. Im allgemeinen muß man Apparate zu Hilfe nehmen, und das Auge hat dann nur die, freilich immer noch entscheidende Aufgabe, den Apparat abzulesen. Dabei kann es sich um zu messende Dinge handeln, für die wir, wie für Elektrizität und Magnetismus, überhaupt kein Sinnesorgan haben; der Apparat muß alsdann die betreffende Erscheinung in eine dem Auge zugängliche Sprache übersetzen, d. h. sichtbar oder dem Ohre, etwa mittels des Telephons, hörbar machen. Unter den Apparaten selbst sind drei Stufen zu unterscheiden: die bloßen Anzeiger oder -skope, die wirklichen Messer oder -meter und die Aufzeichner oder -graphen. Man wird sagen: die Anzeiger gehören nicht hierher, weil sie nicht messen; indessen kann man auch vermöge einer bloßen Anzeige eine Messung, und sogar eine besonders genaue, ausführen, indem man eine sogenannte Nullmethode anwendet. Wenn man z. B. in den Brückenzweig eines Stromnetzes ein Galvanoskop einschaltet, also einen Apparat, der lediglich angibt, ob ein Strom durchfließt oder nicht, so kann man aus der Tatsache der Nullstellung der Nadel gewisse sehr exakte Schlüsse über die Strom- und Widerstandsverhältnisse im Netz ziehen. Am höchsten stehen natürlich die -graphen, und zwar nicht bloß, weil sie eine stetige Aufzeichnung von Größenwerten leisten, sondern auch, weil sie während ihrer Tätigkeit völlig sich selbst überlassen werden und somit ungestört bleiben dürfen.

15. **Beobachtungsfehler. Mittelwert und wahrscheinlicher Fehler. Systematische und zufällige Fehler.** Das Ergebnis irgendeiner Messung besteht in der Angabe, wie oft die für Größen der betreffenden Art geltende Einheit in der gemessenen Größe enthalten ist, natürlich in Ganzen und, wenn nötig, in Bruchteilen ausgedrückt. Dieses Ergebnis ist aber nicht von unbegrenzter Zuverlässigkeit und Genauigkeit, es ist sicher mit einem gewissen, kleineren oder größeren Fehler behaftet; erst, wenn man sich über diesen eine möglichst deutliche Vorstellung gebildet hat, hat das Messungsergebnis einen brauchbaren Sinn. Man nennt solche Fehler Beobachtungsfehler und unterscheidet verschiedene Arten von ihnen. Einige rühren vom Apparate her, andere von seiner Benutzung, noch andere von der Umgebung und die letzten vom Beobachter; diese kann man als persönliche Fehler jenen als sachlichen gegenüberstellen. Die persönlichen Fehler werden von Person zu Person wechseln, aber auch für einen und denselben Beobachter je nach seiner Uebung, Ermüdung, Stimmung usw. Ferner ist eine wichtige Unterscheidung die zwischen zufälligen und systematischen Fehlern; jene sind der reine Ausdruck der Unvollkommenheit alles Menschlichen und aller menschlichen Einrichtungen, sie sind relativ harmlos, da sie bald nach der einen, bald nach der anderen Seite gehen werden und folglich dadurch ausgemerzt werden können, daß man die betreffende Beobachtung öfters wiederholt. Schlimmer sind die systematischen Fehler, weil sie einseitigen Charakters sind und deshalb auch bei oft wiederholter Beobachtung ein falsches Resultat liefern. Man muß daher zunächst diese systematischen Fehler erforschen, d. h. vor allen Dingen sich alle Ueberlegungen vorführen, die die Existenz solcher Fehler möglich erscheinen lassen und, wenn sie wirklich erkannt sind, durch Verbesserung des Verfahrens nach Möglichkeit beseitigen; geht das nicht, so muß man sie quantitativ zu erfassen suchen und als Korrektion in das Messungsergebnis einführen. Es sei hier nur ein Beispiel angeführt: bei der Signalmethode zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit muß man durch Drücken auf einen Knopf die Ankunft des Signals zeitlich festlegen, findet dabei aber immer zu kleine Zahlen für die Schallgeschwindigkeit, und zwar aus dem in diesem Falle naheliegenden Grunde, weil man zu dem Entschlusse, den Knopf zu drücken, eine kleine,

aber hier doch merkliche Zeit braucht, die man eliminieren muß, ehe man das Endresultat ermittelt. Später hat man die Methode in der Weise modifiziert, daß man das Signal seine Ankunft selbsttätig aufzeichnen ließ, und zwar elektromagnetisch; hier ergab sich aber eine noch kleinere Schallgeschwindigkeit, und hier lag die Schuld an dem elektromagnetischen Apparate, der eine merkliche Zeit zum Funktionieren brauchte. Je komplizierter der Apparat und die Folge der Ablesungen ist, desto mehr systematische Fehler können sich einschleichen, und desto schwieriger ist ihre Eliminierung. Es gibt immer eine große Anzahl von wissenschaftlichen Messungsarbeiten, die einen lange Zeit unerkannt gebliebenen systematischen Fehler enthielten, bis er durch anderweitige Kontrolle herauskam; und der lange Zeit für richtig gehaltene Wert der betreffenden Größe mußte nunmehr berichtigt werden. So hat man z. B. jahrzehntelang geglaubt, die obere Hörgrenze des Menschen liege bei 80 000 Schwingungen in der Sekunde, und erst ganz neuerdings weiß man, daß sie viel tiefer, etwa bei 20 000 oder höchstens 30 000 liegt; die Stimmgabeln, mit denen die Messung ausgeführt wurde, hatten eben einen systematischen Fehler. So krasse Berichtigungen werden nun ja nicht häufig sein; aber die kleinen Berichtigungen sind ebenfalls wichtig und manchmal erst sehr mühsam zu leisten, weil es sich um schwache und sehr verborgene Fehlerursachen handelt, die zuweilen nur durch einen Zufall ermittelt werden.

Von großer Bedeutung für die Genauigkeit einer Meßmethode ist es ferner, ob sie die zu messende Größe direkt oder indirekt, durch eine einzige Messung oder mehrere solche liefert. Unter indirekt ist dabei der sehr häufige und oft gar nicht zu umgehende Fall verstanden, daß die Ablesung nicht die Größe selbst, sondern z. B. ihren Kubus oder ihre Kubikwurzel liefert. Im ersten Falle ist die Methode gut, da der Beobachtungsfehler durch die nachträglich vorzunehmende Ziehung der Kubikwurzel stark ermäßigt wird, im zweiten Falle ist die Methode ungünstig, weil der Fehler durch die nachträglich erforderliche Kubizierung stark vergrößert wird: Hat man z. B. in jenem Falle 729 beobachtet, während der wahre, etwa anderweitig bekannte Wert des Kubus der Größe 1000 ist, so hat man einen Beobachtungsfehler von 27 % gemacht, im schließlichen Ergebnis aber — 9 statt des wahren Wertes 10 — nur einen Fehler von 10 %; und umgekehrt im zweiten Falle. Setzt sich ferner, wie gesagt, die Messung aus vielen Einzelmessungen zusammen, — zur Ermittelung des spezifischen Wärme eines Körpers muß man z. B. zwei oder drei Gewichte und drei Temperaturen messen — so kann das Ergebnis, wenn das auch nicht gerade sehr wahrscheinlich ist, eine Kumulation aller Einzelfehler enthalten; unter Umständen kann man sich dagegen durch besondere Kunstgriffe sichern.

Eine weitere Fehlerquelle entsteht aus den Umständen, die mit der Natur der Messung als einer Vergleichung verknüpft sind, d. h. damit, daß man die Messung erst an einem Körper, dann aber an einem anderen vornehmen muß; es sei denn, daß man beides gleichzeitig mißt, was eben der Vorzug der oben erwähnten Nullmethoden und allgemeinerer Kompensations- und Differentialmethoden ist. Wenn man nämlich die Messungen nacheinander anstellt, so ist man nicht sicher, daß sich nicht inzwischen die sachlichen oder persönlichen Messungsumstände geändert haben; man kann daher leicht zwei Werte erhalten, die nicht streng vergleichbar sind. Um das zu vermeiden, muß man die Beobachtungen symmetrisch anordnen, also z. B. im einfachsten Falle erst die eine Messung, dann die andere und zum Schluß die erste noch einmal anstellen, um alsdann das Mittel aus der ersten und letzten mit der mittleren zu vergleichen.

Da man jede zu messende Größe wiederholt bestimmen muß und jedesmal eine etwas andere Zahl erhält, erhebt sich die Aufgabe, aus den Einzelwerten das möglichst beste Endresultat abzuleiten und zugleich anzugeben, wie groß das Vertrauen ist, das man in es setzen darf; das geschieht durch Angabe des wahrscheinlichen Fehlers, der seinem Vorzeichen nach unbestimmt bleibt, d. h. die Endzahl kann um den angegebenen Betrag zu groß oder zu klein sein. Am einfachsten gestaltet sich dieses ganze Verfahren da, wo es sich nur um eine einzige zu messende Größe handelt und zwar um eine, die in allen beobachteten Fällen im Prinzip denselben Wert haben soll. Dann lautet die Vorschrift einfach dahin: man nehme das arithmetische Mittel aus allen Einzelwerten, d. h. man addiere sie sämtlich und dividiere dann durch die Anzahl der Einzelwerte. Sind z. B. die Einzelwerte

37 32 33 39 44 34 28 (Anzahl 7),

so ist die Summe 247 und das arithmetische Mittel 35,3; folglich sind die Fehler der einzelnen Beobachtungen:

$+ 1{,}7 - 3{,}3 - 2{,}3 + 3{,}7 + 8{,}7 - 1{,}3 - 7{,}3$,

und ihre algebraische, d. h. mit Rücksicht auf das Vorzeichen genommene Summe ist natürlich null (das ist ja der Sinn des Mittelwertes). Nun fragt sich weiter, wie groß denn der mittlere Fehler jedes

Einzelwertes ist; und hier könnte man auf den naheliegenden Gedanken kommen, alle Fehlerquellen zu addieren ohne Rücksicht auf das Vorzeichen und dann durch 7 zu dividieren, womit man 28,3: 7, also 4,04 erhielte. Eine nähere Untersuchung ergibt aber, daß dieses Verfahren den Verhältnissen nicht gerecht wird; es kommt dabei nicht zum Ausdruck, daß die starken Fehler das Vertrauen in das Ergebnis ganz besonders stark beeinträchtigen. Das richtige Verfahren, das hier nicht bewiesen werden kann, besteht darin, daß man die einzelnen Fehlerquadrate bildet, ihre Summe (S) bildet, (Vorzeichen kommen hier nicht in Frage, da Quadrate immer positiv sind), durch die um eins verminderte Anzahl n der Einzelbeobachtungen dividiert und schließlich die Wurzel zieht, in Formel

$$f = \sqrt{\frac{S}{n - 1}}.$$

In unserem Falle erhält man als Fehlerquadrate:

2,89 10,89 5,29 13,69 75,69 1,69 53,29,

als ihre Summe 163,43 und schließlich als mittleren Fehler eines Einzelwertes 5,22 — eine Zahl, die, wie man sieht, erheblich größer ist als die, die das falsche Verfahren geliefert hätte. Statt den Fehler in Form einer Zahl, kann man ihn auch in Prozenten des Mittelwertes der gemessenen Größe selbst angeben, wodurch man sich ein viel deutlicheres Bild von dem realtiven Fehler machen kann, und erhält dann als mittleren prozentischen Einzelfehler 14,7 %. Um nun zu dem Fehler des Endergebnisses überzugehen, der natürlich infolge der Kombination vieler Einzelbeobachtungen viel kleiner ist als der einer Einzelbeobachtung, muß man, wie die Theorie nachweist, noch mit der Wurzel aus der Anzahl der Beobachtungen dividieren, erhält also die Formel

$$F = \sqrt{\frac{S}{n\,(n - 1)}}.$$

In unserem Falle gibt das 1,97 oder 5,6 %. Dies ist der mittlere Fehler des Ergebnisses; er nimmt, wie man sieht, ab, wenn die Zahl der Beobachtungen zunimmt. Noch wichtiger und von ihm verschieden ist das, was man den wahrscheinlichen Fehler nennt; er besagt, daß es ebenso wahrscheinlich ist, daß der Fehler größer wie daß er kleiner sei; sein Wert hängt von dem Charakter der zu messenden Größe ab, insbesondere davon, ob sie positive und negative oder nur positive Werte haben kann, ob sie beliebig große Werte annehmen kann oder nur solche bis zu einer bestimmten Grenze usw. Im einfachsten Falle wird der wahrscheinliche Fehler reichlich zwei Drittel des mittleren, in unserem Falle also für jede Einzelzahl 3,48 und für die Endzahl 1,33 oder 3,76 %. Schließlich schreibt man also das Ergebnis der ganzen Beobachtung und Berechnung in der Form:

$$35{,}3 \pm 1{,}33.$$

Wie man sieht, sind die Zehner der gefundenen Zahl gesichert, die Einer werden höchstens um eine Einheit falsch sein, dagegen sind die Zehntel ganz unsicher. Es ist durchaus notwendig, bei der Angabe einer ermittelten Zahl zwar so genau zu verfahren wie möglich; es ist aber irreführend, diese Genauigkeit zu übertreiben und Stellen anzugeben, die außerhalb der Fehlergrenzen liegen; man muß eben mit den Dezimalstellen an der richtigen Stelle aufhören und bei ganzen Zahlen aus vielen Stellen für die letzten Stellen lieber Nullen nehmen, als durch Einsetzung bestimmter Ziffern den Eindruck zu erwecken, als ob diese Stellen sicher wären.

Unter den zahlreichen Beobachtungen einer und derselben Größe sind zuweilen nicht alle gleich zuverlässig, und es ist dann ungerechtfertigt, allen denselben Einfluß auf den Mittelwert einzuräumen. Manchmal ist es dann möglich, so zu verfahren, daß man einigen Einzelwerten doppeltes Gewicht beilegt, d. h. so verfährt, als ob man sie zweimal beobachtet hätte, eventuell auch dreimal usw.; oder man berücksichtigt einzelne Beobachtungen nur mit dem halben Gewicht. Indessen muß man hierbei sehr vorsichtig verfahren und jede subjektive Parteilichkeit sorgfältigst vermeiden. Ebenso ist es unzulässig, einzelne Beobachtungen bloß deshalb auszuschließen, weil der betreffende Wert abnorm ercheint; er wird ja dann ohnehin keinen großen Einfluß auf die Endzahl gewinnen; nur wenn man bestimmte Gründe angeben kann, warum dieser Wert so abnorm ausgefallen ist, darf man ihn weglassen.

Die Ermittelung des wahrscheinlichen Fehlers einer gemessenen Größe ist für viele Fragen von großer Bedeutung; es sei nur ein Beispiel angeführt. Es handelt sich um zwei Größen, von denen man nicht weiß, ob sie gleich oder verschieden sind, etwa die Intensität des Erdmagnetismus im Sommer und im Winter. Man mißt die eine zehnmal und bestimmt den Mittelwert nebst dem wahrscheinlichen Fehler; ebenso die andere. Ist nun die Differenz beider Mittelwerte noch innerhalb der Fehlergrenzen jedes der beiden Werte gelegen, so muß man beide Größen für gleich erklären; ist sie größer, so kann man mit Wahrscheinlichkeit annehmen, daß sie verschieden sind, daß also der Erdmagnetismus im

Sommer einen anderen Wert habe wie im Winter.

Das obige Verfahren setzt voraus, daß die Fehler der Einzelwerte regellos verteilt sind. Es kommt aber häufig vor, daß man eine Größe viele Male hintereinander bestimmt, und daß man jedes folgende Mal einen kleineren oder jedesmal einen größeren Wert findet; die Zahlen zeigen eine regelmäßige Tendenz. In diesem Falle muß man nach der Ursache forschen und, solange nicht nachgewiesen ist, daß es keine erkennbare Ursache gibt, auf die Mittelbildung verzichten. Schwierig ist die Sache nur in den Zwischenfällen, wo die Tendenz der Zahlenreihe keine ausgesprochene ist, wo man aber doch erkennen kann, daß die Zahlen mehr ab- als zunehmen oder umgekehrt, oder wo sie im großen Ganzen erst mehr zunehmen und in der zweiten Hälfte wieder abnehmen. Es gibt für solche Fälle gewisse Regeln für die Untersuchung der Frage, ob ein begründeter Verdacht auf systematische Fehler, also auf bestimmte Ursachen der Abweichungen vorliegt; jedoch muß es an diesem Hinweise genügen.

16. Funktionsgrößen. Interpolation. Nun aber sei der wichtigste Fall, der sogar in der Physik die Regel darstellt, betrachtet, wo man von vornherein weiß, daß die zu messende Größe je nach den Umständen verschieden ausfällt, daß sie also die Funktion einer anderen Größe oder mehrerer solcher ist; man muß dann diese andere Größe, die sog. unabhängige Variable, möglichst weitgehend variieren und für jeden dieser Werte den zugehörigen Wert der Funktion, d. h. der abhängigen Variabeln, bestimmen, so daß eine Reihe entsprechender Wertepaare vorliegt. Aus diesem Material muß man nun entweder auf rechnerischem Wege die Funktion in ihrer mathematischen Gestalt ermitteln, so daß man dann in der Lage ist, den Wert der gesuchten Größe auch für jeden, nicht direkt beobachteten Wert der unabhängigen Variabeln durch Einsetzung des betreffenden Zahlenwertes auszurechnen; oder man muß, wenn das nicht angeht oder zu umständlich ist, die beobachteten Wertepaare in ein Koordinatennetz, auf sogenanntes Millimeterpapier eintragen, die erhaltenen Punkte durch eine möglichst einfache und gleichmäßige Kurve verbinden und hat dann in dieser Kurve das anschauliche Bild jener Funktion. Man nennt das erstere Verfahren rechnerische, das andere graphische Interpolation; damit ist zugleich gesagt, daß man nur Zwischenwerte auf diese Weise erhält, daß dagegen die Extrapolation im allgemeinen gefährlich und mehr oder weniger unzuverlässig ist. In der beistehenden Figur ist ein Beispiel des graphischen Verfahrens gegeben; die wirklich beobachteten Werte sind mit Sternen bezeichnet.

17. Kurvenscharen und Modelle. Die Figur enthält, wie man sieht, nicht bloß eine Kurve, sondern mehrere, eine sogenannte Kurvenschar; das hat folgende Bedeutung. Im allgemeinen ist eine gesuchte

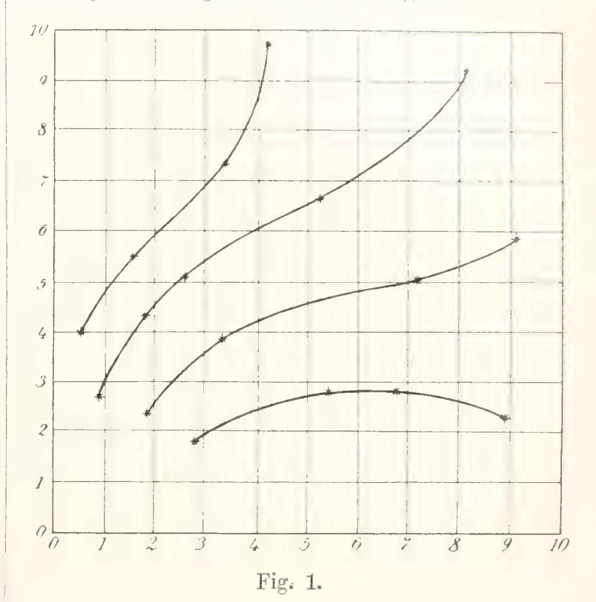


Fig. 1.

Größe nicht bloß Funktion einer, sondern mehrerer Variabeln; man muß daher, um zunächst die Abhängigkeit von der einen zu ermitteln, die andere konstant erhalten und gewinnt so eine Kurve; dann muß man jener zweiten Variabeln einen anderen Wert geben, diesen wiederum konstant erhalten und von neuem die Abhängigkeit der Funktion von der ersten Variabeln ermitteln, so daß man eine zweite Kurve erhält usw. Man könnte auch eine ganz andere Kurvenschar erhalten, wenn man nämlich zuerst die Abhängigkeit von der zweiten Variabeln ermittelt und durch eine Kurve darstellt, und dies dann für andere Werte der ersten Variabeln wiederholt; beide Darstellungen besagen dasselbe in verschiedener Form. Will man beide Darstellungen zu einer einzigen verknüpfen, so muß man also die gesuchte Größe sofort als Funktion zweier Variabeln darstellen, und das ist auf dem Papier nicht möglich, wohl aber im Raume, indem man die beiden unabhängigen Variabeln als Koordinaten in der Horizontalebene ansieht, die Funktion aber als die in jedem Punkte der Ebene zu errichtende Senkrechte, deren Höhe den dortigen Wert der Funktion angibt; auf diese Weise kann man die Grundlage gewinnen zur Herstellung eines Gipsmodells der betreffenden

Funktion; die früheren Kurven sind nichts anderes als die Schnitte dieses Modells mit einer der Koordinatenebenen.

18. Methode der kleinsten Quadrate. Bisher ist es immer nur eine einzige Größe gewesen, die zu bestimmen war. Handelt es sich um eine ganze Anzahl solcher, so muß man natürlich eine entsprechende Anzahl von Beobachtungen anstellen, und die Sache ist einfach, wenn jede Beobachtung gerade den Anhalt für eine der zu messenden Größen enthält. Dieser Fall tritt aber sehr selten ein; meist sind die gesuchten Größen mit den gegebenen sozusagen verkettet, es sind für die gesuchten Größen ebensoviele Gleichungen aus den Beobachtungen abgeleitet worden, und man muß nunmehr diese Gleichungen auflösen, um alle Unbekannten zu finden. Hierbei findet man aber für jede Größe nur einen einzigen Wert und erhält keinen Anhalt für dessen Genauigkeit. Um das zu erreichen, muß man mehr Beobachtungen anstellen, als Größen gesucht sind, kommt aber nun offenbar wegen der Verkettung dieser Größen in den Gleichungen nicht mehr mit einer einfachen Mittelbildung aus, sondern muß nach einem anderen Verfahren suchen. Dieses ist von Gauß auf Grund der Wahrscheinlichkeitsrechnung ausgearbeitet worden und heißt die Methode der kleinsten Quadrate. Es ist unmöglich, ohne zu mathematisch zu werden und ohne den gegebenen Raum zu überschreiten, diese Methode hier wiederzugeben; es muß an einer kurzen Andeutung genügen. Die Methode liefert für die gesuchten Größen solche Werte, daß die Summe der Quadrate der Abweichungen aller Einzelwerte von ihnen so klein wie möglich wird. Ein Beispiel allgemeinerer Art stellt der Fall dar, wo eine gesuchte Größe eine Funktion zwar nur einer einzigen Variabeln ist, diese aber in verschiedenen Potenzen enthält, jede mit einem geeigneten Koeffizienten versehen, also in Formel:

$$F = a + bx + cx^2 + dx^3;$$

es würde zur Not genügen, für vier Werte von x die zugehörigen Werte von F zu messen; man würde dann vier Gleichungen von der Form der obigen erhalten, indem man der Reihe nach die vier Wertepaare für x und F einsetzt, und hieraus durch Auflösung die vier Größen a, b, c, d ermitteln. Wie bemerkt, ist es aber besser und nahezu unentbehrlich, statt der vier Beobachtungen deren etwa acht anzustellen, so daß man jetzt acht Einzelgleichungen bekommt; und die Methode der kleinsten Quadrate lehrt nun, aus ihnen die vier Größen mit ihren wahrscheinlichsten Werten abzuleiten, Werten, die, in die acht Einzelgleichungen eingesetzt, keine von ihnen genau befriedigen würden, im ganzen aber doch am besten stimmen. Durch eine weitere Formel findet man dann schließlich den wahrscheinlichen Fehler jeder der vier ermittelten Größen. Das Verfahren läßt für bestimmte Zwecke gewisse Vereinfachungen, für andere zweckmäßige Umgestaltungen zu und hat sich in allen diesen Formen so bewährt, daß es längst zum unentbehrlichen Hilfsmittel der Rechnung in Physik, Astronomie, angewandter Mathematik und vielen anderen Gebieten geworden ist.

Literatur. ***H. Poincaré***, *Wissenschaft und Hypothese Leipzig 1904.* — ***F. Auerbach***, *Kanon der Physik. Leipzig 1899.* — ***Pearson***, *Grammar of Science. London 1900.* — ***H. v. Helmholtz***, *Vorträge und Reden. Braunschweig* — ***B. Weinstein***, *Handbuch d erphysikalischen Maßbestimmungen. Berlin 1888. 2 Bände.* — ***F. Kohlrausch***, *Lehrbuch der praktischen Physik. 11. Aufl. Leipzig 1910.* — ***C. F. Gauss***, *Abhandlungen zur Methode der kleinsten Quadrate. Berlin 1877.* — ***M. Cantor***, *Theorie der Beobachtungsfehler. Leipzig 1891.* — ***J. D. Everett***, *Units and physical Constants. London 1879.* — ***Czuber***, *Theorie der Beobachtungsfehler. Leipzig 1891.* — ***Guillaume***, *Unités et étalons. Paris 1893.* — ***A. Czogler***, *Dimensionen und absolute Maße, Leipzig 1889.* — ***H. Herwig***, *Physikalische Begriffe und absolute Maße. Leipzig 1880.*

F. Auerbach.

Massendefekt und Massenüberschuß.

Anomalien in der Verteilung der Schwere der Erde. Durch Pendelmessungen wurde festgestellt, daß unter jedem Gebirge ein Massendefekt, unter jeder geologischen Einsenkung ein Massenüberschuß vorhanden ist (vgl. den Artikel „Gebirgsbildung“).

Massenmessung.

1. Einheit. 2. Hebelwage. 3. Die gleicharmige Wage. 4. Wägeverfahren: a) Substitutionsmethode nach Borda. b) Vertauschungsmethode nach Gauß. 5. Etalonnierung von Gewichtssätzen. 6. Reduktion der Wägungen auf den leeren Raum. 7. Robervalsche Wage. 8. Ungleicharmige Hebelwagen: a) Schnellwage. b) Briefwage. c) Brückenwage. 9. Federwage. 10. Poggendorffsche Wage. 11. Verwendung des Wageprinzipes in verschiedenen Gebieten der Physik: a) Laufgewichtsbarograph. b) Elektrometrische Wage. c) Elektrodynamische Wage. d) Magnetische Wage.

1. Einheit. Die Entstehung der heutigen Masseneinheit ist aufs engste mit der Ent-

wickelung der metrischen Längeneinheit verknüpft (vgl. den Artikel „Längenmessung"). Die von der französischen Regierung im Jahre 1790 zur Lösung der Frage der Längeneinheit eingesetzte Kommission schlug in ihrem im Jahre 1791 erstatteten Bericht vor, die Masseneinheit auf die Längeneinheit zu gründen und sie als die Masse eines durch die neue Längeneinheit gemessenen Volumens Wasser von 0^0, gewogen im Vakuum, festzusetzen.

Der Vorschlag der Kommission wurde später nur insofern verändert angenommen, als man an Stelle der Temperatur 0^0 eine nahe bei 4^0 liegende Temperatur wählte und 1 Kilogramm als die Maße von 1 cdm Wasser im Zustande seiner größten Dichte definierte.

Lefèvre-Gineau unternahm es auf Grund dieses Beschlusses ein Normal der neuen Masseneinheit herzustellen. Ein Messingzylinder wurde durch Kontaktmessungen sehr sorgfältig linear ausgemessen, hieraus sein Volumen berechnet, endlich wurde der Zylinder in Wasser gewogen. Auf Grund aller dieser Versuche schuf Lefèvre-Gineau einen Platinzylinder, der die neue Masseneinheit verkörperte und als „Kilogramme des Archives" die Masseneinheit des neuen metrischen Systems bildete.

Wie das Mètre des Archives, so wurde später auch das Kilogramme des Archives seitens der Convention diplomatique du Mètre im Jahre 1875 einem neu zu schaffenden Massenurnormal zugrunde gelegt. In Wirklichkeit sind heute alle Masseneinheiten des metrischen Systems auf das neue Massenurnormal, d. h. auf einen Platiniridiumzylinder von 39 mm Höhe und gleichem Durchmesser mit abgerundeten Kanten bezogen, welcher mit dem kilogramme des Archives vollkommen übereinstimmt, und sich im Gewahrsam des Bureau international des Poids et Mesures befindet. Die Massen der nationalen Prototype, welche an die Staaten der Convention diplomatique du Mètre ebenso wie die Platiniridiummeter durch das Los verteilt sind, sind an das internationale Prototyp seitens des Bureau international mit einem wahrscheinlichen Fehler von etwa $\pm$ 0,002 mg angeschlossen.

Lefèvre-Gineau hat sich seiner Aufgabe, die Masseneinheit aus der Längeneinheit abzuleiten, mit einer bewunderungswürdigen Geschicklichkeit unterzogen. Mehrere Versuche, die in neuerer Zeit zur Nachprüfung der Größe der Masseneinheit unternommen worden sind, haben das überraschende Resultat ergeben, daß das Kilogramm sehr nahe mit seinem Definitionswert übereinstimmt. Die namentlich hinsichtlich der Längenmessungen mit den allerfeinsten Hilfsmitteln im Bureau international des Poids et Mesures ausgeführten Untersuchungen führten zu der Erkenntnis, daß das Volumen von 1 kg reinen luftfreien Wassers bei 4^0 und unter normalem Druck

$$1{,}000\,027 \text{ dm}^3,$$

die Masse von 1 dm^3 dieses Wassers

$$0{,}999\,973 \text{ kg}$$

beträgt, wobei die Unsicherheit dieser Werte wahrscheinlich nicht eine Einheit der letzten angegebenen Stelle, entsprechend 1 mg auf 1 kg überschreitet. Das Kilogramm würde also durch einen Würfel Wasser von 1,000 009 dm Kantenlänge repräsentiert werden. Selbstverständlich wird man nicht daran denken, auf Grund dieser Messungsergebnisse die Masseneinheit zu ändern, ebensowenig wie man die Resultate genauerer Gradmessungen zu einer Verbesserung der Längeneinheit benutzt hat. Man hat ja auch zu einer Aenderung der Masseneinheit aus dem angegebenen Grunde schon deswegen keine Veranlassung, weil die Abweichung des jetzigen Wertes vom Definitionswert praktisch ganz ohne Bedeutung ist und, wo sie in der Wissenschaft merklich wird, leicht in Rechnung gezogen werden kann.

Die Masseneinheit, das Kilogramm (kg), wird für die Zwecke der praktischen Verwendung eingeteilt in 1000 Gramm (g); die Zwischenstufen, das Hektogramm (hg) = 100 g und Dekagramm = 10 g sind wenig gebräuchlich. Das Gramm, welches mit dem Centimeter und der Sekunde die Grundlage des in der Physik gebräuchlichen sogenannten absoluten Maßsystems bildet, wird eingeteilt in 10 Dezigramm (dg), 100 Zentigramm (cg) und 1000 Milligramm (mg). Von den Vielfachen des Kilogramm ist international als Einheit noch die Tonne (t) = 1000 kg gebräuchlich. Nur im Deutschen Reiche kennt man den durch Bundesratsbeschluß eingeführten Doppelzentner (Dz) = 100 kg.

Das Kilogramm ist als Masseneinheit, wie das Meter als Längeneinheit, in einem großen Teile der zivilisierten Welt bereits eingeführt. Eine Ausnahme bildet hauptsächlich nur noch England mit seinen Kolonien, wo das alte Pfund als Masseneinheit gilt, eigentümlicherweise in zwei Formen, nämlich als Troygewicht (1 Pfund = 0,3732 kg; Einteilung in 12 ounces zu je 20 pennyweights) und als Avoirdupoidsgewicht (Handelsgewicht; 1 Pfund = 0,4536 kg; Einteilung in 16 ounces zu je 16 drams).

Wie beim Längenmaß sind auch die Anforderungen, die man an die Genauigkeit eines Massenmaßes stellt, sehr verschieden. Beim Einkauf von 1 kg Zucker oder Fleisch hat der Käufer kaum ein Interesse daran, daß das als Normal

benutzte Massenstück auf 1 kg richtig ist, denn der Einfluß der möglichen anderen Fehlerquellen, z. B. die Masse des Verpackungsmaterials, welches dem Käufer vielfach zur Last gelegt wird, bedingen für ihn eine weit größere Schädigung. Anders etwa beim Verkaufe und Kaufe von Edelmetall, wobei man kleine Bruchteile des Gramms noch in Rechnung zieht. Das Gramm ist eine Massengröße, welche man im praktischen Leben meist zu vernachlässigen pflegt. Andererseits ist für manche Apothekerwaren das Gramm schon eine recht große Masse. Man wägt hier, z. B. bei den stark wirkenden Giften, nach Zentigrammen oder gar nach Milligrammen.

Dementsprechend sind die Eichgrenzen (über die Organisation des Eichwesens im Deutschen Reiche vgl. einiges im Artikel „Längenmessung") für die verschiedenen Zwecken dienenden Massenstücke sehr verschieden weit gezogen. Auch das Material der Massenstücke ist dem Verwendungszweck angepaßt. Die größeren Handelsgewichte bestehen meist aus Eisen, die kleineren Stücke vom Kilogramm abwärts vielfach aus Messing; Bruchgramme, fast immer in Scheibenform, sind in der Regel aus Neusilber hergestellt. Für wissenschaftliche Zwecke versieht man die Gewichtsstücke, soweit man sie nicht ganz aus einem Edelmetall (Platin oder Platiniridium, Gold usw.) herstellen kann, wenigstens mit einem schützenden Ueberzug solchen Materials; außer den Edelmetallen hat sich Nickel, sei es im ganzen, sei es als Ueberzug recht gut bewährt. Kleine Massenstücke, insonderheit die Bruchgramme, pflegt man für wissenschaftliche Zwecke aus Platin herzustellen, unterhalb 1 cg aus Aluminium; die kleinsten Gewichtsstücke, welche in dieser Form noch gebrauchsfähig erhalten werden können, sind solche von der Masse 0,05 mg.

Je nach der Beständigkeit des Materials ändern sich alle Massenstücke mehr oder weniger mit der Zeit. Insbesondere tritt infolge der Oxydation oder der Kondensation von Feuchtigkeit oder infolge Schmutz mit der Zeit eine Massenvermehrung ein, die in den Fällen, in denen das Verhältnis von Oberfläche zu Masse sehr groß ist (z. B. bei den Bruchgrammen), auch recht beträchtliche Werte annehmen kann. Bei den größeren Handelsgewichten, namentlich denen aus Messing, wird die Massenzunahme infolge Oxydation durch die Abnutzung beim Gebrauche, oder auch durch Reinigung der Stücke erheblich überkompensiert, so daß solche Stücke dauernd an Masse abnehmen und sogar bei amtlichen Nachprüfungen der Konfiszierung zum Opfer fallen können.

Die Vereinigung mehrerer Massen derart, daß man aus ihnen verschiedene Massen zusammensetzen kann, nennt man **Massensätze**, im gewöhnlichen Leben meist **Gewichtssätze**. Bei der Stückelung der Gewichtssätze befolgt man die gleichen Regeln wie bei der Stückelung der Münzen im Deutschen Reich (in neuerer Zeit ist diese Regel bekanntlich durch die Schaffung des Dreimarkstückes durchbrochen), daß man innerhalb jeder Dekade Massenstücke von den Nennwerten 5, 2, 1 schafft. Man sieht, daß man jeden Wert innerhalb einer Dekade bilden kann, wenn man entweder den 2-Wert doppelt besetzt, oder wenn man die Einheit dreifach herstellt. Statt die Einheit dreifach zu bilden, begnügt man sich auch wohl mit einer Verdoppelung; der dritte Wert der Einheit wird dann durch die Summe aller Stücke der nächsten Dekade geliefert. Bei wissenschaftlichen Untersuchungen benutzt man gern eine Stückelung des Gewichtssatzes von 4, 3, 2, 1 in jeder Dekade, welche sich zur Untersuchung eines Gewichtssatzes in sich besser eignet (vgl. unter 5); vollkommener wird der letztere Zweck durch die Stückelung 5, 4, 3, 2, 1 erreicht, die obendrein den Vorteil hat, daß zur Zusammensetzung einer beliebigen Masse in jeder Dekade höchstens zwei Stücke nötig sind. Eichfähig sind im Deutschen Reich, abgesehen von einzelnen Ausnahmen, nur die Stücke 5, 2, 1.

Wieviel Dekaden ein Gewichtssatz zu umfassen hat, richtet sich nach den Zwecken, denen er dienen soll. Nach oben hin ist die Grenze durch die Handlichkeit der einzelnen Stücke gegeben. Mit Gewichtsstücken höher als 50 kg zu gehen, empfiehlt sich schon deswegen nicht, weil größere Stücke nicht mehr von einem Menschen regiert werden können; außerdem kann man mit solchen Stücken bei Dezimalwagen (vgl. unter 8) 500 kg, bei Zentesimalwagen 5000 kg abwägen, was für die meisten Zwecke ausreichen wird. Nach unten hin ist die Grenze durch die Existenzfähigkeit der einzelnen Stücke, wovon schon oben die Rede war, gegeben. Der Gewichtssatz eines Krämers wird in der Regel von 10 kg bis etwa 5 g reichen, derjenige des Chemikers und des Apothekers von 100 g bis 0,01 g; für wissenschaftliche Untersuchungen, welche Massenvergleichungen als Selbstzweck verfolgen, werden in der Regel noch zwei Dekaden angefügt, so daß der Massensatz bis 0,0001 g = 0,1 mg reicht.

2. Hebelwage. Eine Masse messen, heißt feststellen, wievielmal sie größer ist als eine bekannte, als Einheit gewählte Masse, als das Kilogramm, oder was dasselbe ist, zu bestimmen, wievielmal die Masseneinheit in der unbekannten Masse enthalten ist. Die direkte Lösung dieser Aufgabe bietet große Schwierigkeiten, worauf indessen hier nicht eingegangen werden kann; man hilft sich deshalb mit einer indirekten Methode.

Auf Grund einer Erfahrungstatsache weiß man, daß zwei gleiche Massen von einer dritten Masse in der gleichen Entfernung mit der-

selben Kraft angezogen werden. Wählt man als diese dritte Masse die Erde, so bedarf man nur noch eines Indikators, welcher die Gleichheit von Kräften anzeigt. Ein solcher Indikator ist der gleicharmige Hebel. Belastet man einen gleicharmigen Hebel mit zwei Massen, so weiß man im Falle des Hebelgleichgewichtes, daß beide Massen von der Erde mit der gleichen Kraft angezogen werden, d. h. gleiches Gewicht haben, und schließt daraus, daß auch die beiden Massen einander gleich sind. Auf dieser Erkenntnis beruht die Konstruktion der gleicharmigen Wage, von der unter 3 noch weiter die Rede sein wird.

Ist ein ungleicharmiger Hebel im Gleichgewicht, so verhalten sich nach bekannten Gesetzen die angreifenden Kräfte und demnach auch die diese Kräfte bedingenden Massen umgekehrt wie die Entfernung der Angriffspunkte der Kräfte von dem Drehpunkt des Hebels. Hierauf beruhen weitere Hilfsmittel zur Vergleichung von Massen; sind die beiden Hebelarme zwar ungleich aber unveränderlich, so gelangt man zur allbekannten Dezimalwage und zur Briefwage; bei der sogenannten römischen Schnellwage ist dagegen der eine der Hebelarme, manchmal auch beide, veränderlich. Alle diese Fälle sollen im einzelnen durchgesprochen werden.

3. Die gleicharmige Wage. Die gewöhnliche gleicharmige Wage ist im praktischen Leben vielfach im Gebrauch; man findet sie in jedem Krämerladen; Wagen von größerer Empfindlichkeit benutzt der Apotheker, ganz allgemein der Chemiker zu seinen Arbeiten. Die einfache chemische Wage besteht aus einem Wagebalken, der mit einer stählernen Mittelschneide auf einer eingekerbten oder ebenen sogenannten Pfanne ruht, die von einer starken Säule getragen wird, und auf dieser Schwingungen vollführen kann. Die Pfanne besteht bei einfacheren Wagen ebenfalls aus Stahl, bei feineren Wagen werden statt dessen vielfach geschliffene Steine, insbesondere Achat verwendet. Der Wagebalken trägt in gleicher Entfernung von der Mittelschneide zu beiden Seiten Endschneiden, welche im Gegensatz zur Mittelschneide nach oben gerichtet sind und auf denen wieder in eingekerbten oder ebenen Pfannen die Gehänge ruhen; die Gehänge tragen Wagschalen, welche zur Aufnahme der Last und der sie ausgleichenden Gewichte dienen. Senkrecht zum Wagebalken, meist nach unten gerichtet, ist vor der Mittelschneide ein langer Zeiger, die Zunge, angebracht, welche bei Schwingungen der Wage vor einer mit der Tragsäule verbundenen Teilung spielt und auf dieser die Lage des Wagebalkens abzulesen gestattet. Chemische und Handelswagen sollen der Bedingung genügen, daß innerhalb der zulässigen Fehlergrenzen die Endschneiden gleiche Entfernung von der Mittelschneide haben. Man prüft die Erfüllung dieser Bedingung dadurch, daß man gleiche Gewichte auf beide Wagschalen setzt; unabhängig von der Größe der verwendeten gleichen Gewichte soll die Zunge immer genau auf den Nullpunkt der Skale einspielen, d. h. auf einen Punkt der Skale, welcher genau senkrecht unter der Mittelschneide liegt. Handelswagen werden von den zuständigen Eichämtern auf die Erfüllung dieser Bedingung geeicht; chemische Wagen haben manchmal Justierungsvorrichtungen, mit deren Hilfe man die Lage der Endschneiden korrigieren kann; bei physikalischen Wagen sind die Schneiden in der Regel fest in den Wagebalken eingefügt, so daß außer durch ein umständliches Nachschleifen die Lage der Schneiden später nicht mehr berichtigt werden kann. Es werden aber weiter unten (vgl. unter 4) Verfahren besprochen, nach denen man auch mit Wagen, deren Schneiden nicht vollkommen justiert sind, doch vollkommene Wägungsresultate erhalten kann.

Unter der Empfindlichkeit einer Wage versteht man die Anzahl von Skalenteilen, um welche die Zunge der Wage ausschlägt, wenn man die zur Ruhe gekommene Wage einseitig mit einer kleinen Gewichtseinheit belastet. Die Empfindlichkeit der Wage hängt von der Güte der mechanischen Bearbeitung, namentlich der Schneiden, von der Masse des schwingenden Systems (Wagebalken und Schalen) und vielem anderen, bei gegebenen Verhältnissen insbesondere von der Lage des Schwerpunkts des schwingenden Systems zur Lage der Unterstützungslinie, d. h. der Mittelschneide ab. Je näher der Schwerpunkt der Mittelschneide kommt, desto empfindlicher wird die Wage, d. h. um so viel weiter wird sie durch das gleiche Zulagegewicht aus der vorherigen Ruhelage abgelenkt. Zur Aenderung der Empfindlichkeit ist deshalb häufig auf der Zunge der Wage ein Laufgewicht angebracht, durch dessen Höher- oder Tieferschrauben man den Schwerpunkt des schwingenden Systems der Mittelschneide nähern oder von ihr entfernen kann. Auf jeden Fall aber muß, damit das schwingende System im stabilen Gleichgewicht bleibt, sein Schwerpunkt unterhalb der Mittelschnede iliegen. Hebt man ihn zu sehr, so daß er in die Mittelschneide fällt, so hört die Wage zu schwingen auf; sie verharrt in jeder Lage im indifferenten Gleichgewicht. Hebt man den Schwerpunkt noch weiter, so wird die Wage labil, d. h. ein kleines Zusatzgewicht auf einer der Schalen bringt die Wage zum Umschlagen. Die Empfindlichkeit einer Wage ändert sich im allgemeinen etwas mit der Belastung, weil eine größere Belastung den Wagebalken mehr

durchbiegt als eine kleinere, und so die Entfernung zwischen Schwerpunkt des schwingenden Systems und Schneide vergrößert.

Die Empfindlichkeit der verschiedenen Arten von Wagen ist eine sehr verschiedene. Während eine gewöhnliche Handelswage für 5 kg Tragkraft in der Regel schon auf 1 g einseitige Ueberbelastung kaum noch anspricht, gibt die bessere chemische Wage noch auf 1 cg einen merklichen Ausschlag. Die physikalische Wage liefert selbst bei 1 kg Belastung noch für 1 mg einseitige Belastungsänderung einen Ausschlag der Zunge um 5 bis 10 Skalenteile, ein Ausschlag, den man bei Wägungen höchster Präzision durch ein bei physikalischen Messungen auch sonst viel benutztes Hilfsmittel, durch Spiegel, Skale und Fernrohr auf mehr als das Zehnfache vergrößern kann. Physikalische Wagen für sehr kleine Belastung mit außerordentlich leichtem schwingendem System geben noch für 0,05 mg einseitige Belastungsänderung eine Verschiebung der Zunge um fast 10 Skalenteile.

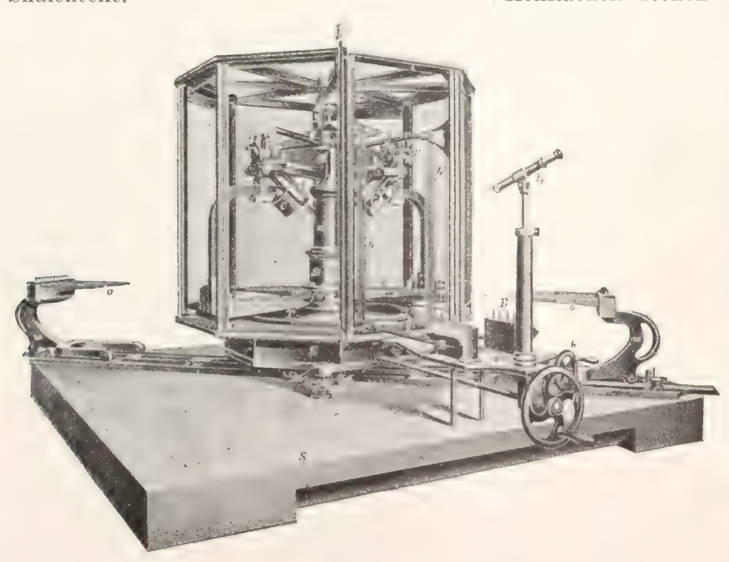


Fig. 1.

So einfach Handelswagen und auch chemische Wagen zu sein scheinen und auch tatsächlich sind, ebenso komplizierte Mechanismen stellen die besseren physikalischen Wagen dar, insbesondere diejenigen, welche in wissenschaftlichen Instituten, sei es lediglich der Vergleichung von Gewichtsstücken untereinander, sei es auch der Erforschung wichtiger Probleme dienen. Figur 1, welche der Zeitschrift für Instrumentenkunde **23**, S. 273, 1903 entnommen ist, zeigt eine solche Wage für 25 kg Tragkraft, welche von Paul Stückrath in Friedenau bei Berlin für die Kaiserliche Normal-Eichungskommission gebaut ist. Wie alle Präzisionswagen ist auch diese Wage mit einer Vorrichtung ausgestattet, welche erlaubt, bei Nichtbenutzung der Wage den Wagebalken von der Mittelpfanne und die Gehänge von den Endschneiden abzuheben, oder wie man auch sagt, die Wage zu arretieren. Diese Arretierung wird durch ein einziges Handrad H ausgeführt, welches die Welle V betätigt. Durch Drehung des Handrades H wird zunächst der Transporteur OfT, von dem später noch die Rede sein wird, gesenkt; bei weiterer Drehung senkt sich dann auch die eigentliche Wagenarretierung und zwar so, daß sich zuerst die Mittelschneide auf ihre Pfanne und fast gleichzeitig die Endgehänge auf die Endschneiden aufsetzen. Die Senkung und Hebung des Transporteurs und ebenso die der eigentlichen Wagenarretierung erfolgt bei der hier abgebildeten Wage durch Gleiten eines Keils, der mittels einer an der Welle V sitzenden dreigängigen Schraube hin- und herbewegt werden kann. Auf den schrägen Keilflächen stehen mittels Rollen die beweglichen Teile der Arretierung auf, welche konzentrisch in der Säule gelagert sind.

Der Transporteur OfT dient der Aufgabe Gaußsche Wägungen (vgl. unter **4**), d. h. Wägungen mit Vertauschung der zu vergleichenden Massen von links nach rechts zu ermöglichen. Die Massen stehen beiderseits zunächst auf den Rosten O des Transporteurs. Senkt sich der Transporteur wie oben beschrieben beim Beginn der Drehung der Welle, so greifen die Rosten O durch die Rosten W, die die Stelle der Wagschalen vertreten, von oben nach unten durch und setzen damit die Gewichte links und rechts auf die Gehänge ab. Arretiert man hernach die Wage, so hebt der Transporteur umgekehrt die Gewichte wieder von dem Gehänge ab und, da die Gehänge bügelförmig gestaltet sind, wird es möglich durch Betätigung des zweiten Handrades M den Transporteur und mit ihm die Gewichte aus den Gehängen um 180°, d. h. soweit herauszudrehen, daß sich der Transporteurrost, der vorher über dem linken Gehänge stand, jetzt über dem rechten Gehänge befindet. Löst man den Arretierungsmechanismus aufs neue, so setzen sich zwar wieder

die Gewichte vom Transporteurrost auf den Gehängerost ab, aber das Gewicht, welches vorher rechts war, ist nun links und umgekehrt, d. h. die Gewichte sind auf den Gehängen vertauscht.

Mit der beschriebenen Wage ist es also möglich, alle zu einer Gaußschen Wägung nötigen Manipulationen ohne Oeffnen des Wagegehäuses aus der Entfernung — die Bedienung solcher Wagen geschieht vielfach vom Platz des Beobachters in etwa 3 m Abstand — vorzunehmen. Auch die Auflage von Reitergewichten, die zu Empfindlichkeitsbestimmungen während der Wägung, sowie zur Ausgleichung kleiner Differenzen dienen, erfolgt meist aus größerer Entfernung. Bei der hier beschriebenen Wage geschieht die Bewegung der Reiter, welche in den Stückelungen 1, 3, 9, 27, 81 mg auf jeder Seite der Wage auf den Nasen NN hängen, durch Bewegung der Hebel BB. Jeder von den fünf Hebeln steht in Verbindung mit einer von fünf ineinander liegenden Röhren RR, deren Bewegung durch Hebelübertragung mittels der Stangen bb oben in der Wage die ineinander gelagerten fünf Röhren rr und die an diesen befestigten Nasen NN in Tätigkeit setzt.

Die Stückelung der Zulagegewichte nach Potenzen von 3 in 1, 3, 9, 27, 81 mg bietet den Vorteil, daß man mit einer geringsten Anzahl von Gewichtsstücken eine größte Zahl von Kombinationen dieser Stücke ausführen kann. Durch Bildung von Summen und Differenzen zwischen beiden Seiten der Wage kann man sowohl rechts wie links von Einheit zu Einheit fortschreitende Zulagen bis zur Summe aller Stücke bilden. Soll beispielsweise rechts eine Zulage von 61 mg erfolgen, so setzt man rechts die Reiter $81 + 9 + 1 = 91$, links die Reiter $27 + 3 = 30$ auf, das gibt als Differenz $91 - 30 = 61$ mg wie verlangt.

4. Wägeverfahren. Für gewöhnliche Wägungen wird, wie schon oben angedeutet, die Bedingung der Gleicharmigkeit der Wage als erfüllt angesehen; sie ist ja auch für solche Zwecke durch die Eichung der Wage genügend gewährleistet. Bei der Abwägung irgendwelcher Materialien begnügt sich der Kaufmann damit, nachdem er die eine Seite der Wage entsprechend belastet hat, auf die andere Seite soviel von den Materialien, Zucker, Reis, Mehl usw. zu schütten, bis die Zunge der Wage auf einen Index oder auf den Nullpunkt einer Teilung einspielt, oder aber, wenn er etwa das Gewicht eines Hutes Zucker ermitteln will, so stellt er diesen auf die eine Wagschale und legt auf die andere so viel Gewichte, bis die Zunge über dem Index steht.

Die Handelswagen erreichen vermöge der ihnen eigenen großen Trägheit den Nullpunkt schnell; anders die besseren chemischen und vor allem diejenigen Wagen, welche zu physikalischen Untersuchungen benutzt werden. Solche Wagen schwingen ebenso wie ein gut gearbeitetes Pendel sehr lange und es würde sehr viel Zeit auf die Wägung verwendet werden müssen, wollte man jedesmal die Einstellung auf den Ruhepunkt, die Gleichgewichtslage, abwarten.

Man hilft sich damit die Gleichgewichtslage aus den Schwingungen selbst abzuleiten. Hierbei ist zu beachten, daß die Schwingungsweiten einer Wage langsam abnehmen, denn wenn man die Wage lange genug schwingen lassen würde, würde ja schließlich infolge von Reibung und Luftdämpfung die Schwingungsweite Null werden, d. h. die Wage würde zur Ruhe kommen. Aus diesem Grunde geht es nicht an, einfach die Mitte zwischen einem Ausschlag nach links und einem Ausschlag nach rechts als Gleichgewichtslage anzunehmen. Man verfährt folgendermaßen: Man beobachtet drei Ausschläge, etwa zwei nach links (l_1 und l_3) und einen dazwischenliegend nach rechts (l_2). Dann würde nach dem eben Gesagten weder l_1 noch l_3 mit l_2 ohne weiteres kombiniert werden dürfen, denn l_1 liegt hierfür zu weit nach links, l_3 zu weit nach rechts, wohl aber würde der Mittelwert von l_1 und l_3 also $\frac{l_1 + l_3}{2}$ als Ausschlag nach links gedacht genau dem gleichen Schwingungszustand der Wage entsprechen wie l_2 nach rechts. Es würde also der weitere Mittelwert von $\frac{l_1 + l_3}{2}$ und l_2, d. h. $\frac{1}{2}\left(\frac{l_1 + l_3}{2} + l_2\right)$ oder anders geschrieben $\frac{1}{4}(l_1 + 2l_2 + l_3)$ die Gleichgewichtslage der Wage darstellen. Es seien z. B. nacheinander an der Skale folgende Einstellungen der Zunge beobachtet: $l_1 = 4{,}2$; $l_2 = 16{,}9$; $l_3 = 4{,}8$, so entspricht dem gleichen Schwingungszustand wie $l_2 = 16{,}9$ nach rechts, nach links $\frac{l_1 + l_3}{2} = 4{,}5$ und das Mittel aus 4,5 und 16,9, d. h. $\frac{4{,}5 + 16{,}9}{2} = 10{,}7$ stellt die Gleichgewichtslage der Wage dar, d. h. diejenige Einstellung, welche die Zunge nach Aufhören der Schwingungen auf der Skale einnehmen würde.

Denkt man sich die Gleichgewichtslage der Wage jedesmal wie hier beschrieben aus Schwingungen ermittelt, so verfahren auch der Chemiker und der Physiker beim Abwägen eines unbekannten Körpers genau so wie der vorher gedachte Kaufmann. Dabei ist aber zu berücksichtigen, daß die physikalische Wage weit empfindlicher ist als eine Handelswage und dementsprechend bei einer Wägung auch eine viel größere Genauigkeit angestrebt wird. So kommt es, daß man selbst unter Zuhilfenahme der kleinsten Ge-

wichtsstücke den abzuwägenden Körper in der Regel nicht ganz ausgleichen kann. Befindet sich etwa der Körper auf der linken, die Gewichte auf der rechten Wagschale, so stellt ein Gewicht A, das als Summe mehrerer Einzelgewichte zu denken ist, die Zunge vielleicht noch nicht auf den Nullpunkt der Skale, sondern ergibt die Skalenablesung 3,2, während die Zufügung von 1 mg, also die Belastung der rechten Seite mit A + 1 mg bereits den Nullpunkt überschreiten läßt und eine Ablesung — 2,5 ergibt. Dann schließt man hieraus, daß der Körper ein Gewicht habe, daß größer als A und kleiner als A + 1 mg ist, also zwischen diesen beiden Gewichten liegt. Welchen Wert das Gewicht wirklich hat, läßt sich leicht berechnen, wenn man sich auf Grund der mitgeteilten Zahlen überlegt, daß eine Verschiebung der Zunge um 3,2 + 2,5 = 5,7 Skalenteile einer Belastungsänderung auf der rechten Seite um 1 mg entspricht. Nun braucht aber zu A nur soviel hinzugefügt zu werden, wie einer Verschiebung der Zunge um 3,2 Skalenteile entspricht, das würde aber nach einfachen Rechnungsmethoden $\frac{3,2}{5,7}$ mg = 0,56 mg sein. Das Gewicht des unbekannten Körpers ist also A + 0,56 mg. Man nennt ein solches Beobachtungs- und Rechnungsverfahren, welches bei physikalischen Messungen häufig angewendet wird, eine Interpolation.

Das soeben geschilderte einfache Wägungsverfahren der Abgleichung zwischen links und rechts, die Tariermethode, setzt die Gleicharmigkeit der Wage, d. h. gleichen Abstand der Endscheiden von der Mittelscheide voraus, eine Bedingung, die bei Handelswagen und den besseren chemischen Wagen im Hinblick auf die angestrebte Genauigkeit in ausreichendem Maße erfüllt ist.

Für physikalische Messungen darf man wirkliche Gleicharmigkeit der Wage nicht voraussetzen. Man darf die Annahme gleicher Hebelarme selbst dann nicht machen, wenn man sie einmal oder öfter gefunden hat, denn eine ungleiche Temperierung der beiden Hebelarme kann ihre sonst bestehende Gleichheit vorübergehend stören. Beispielsweise würde eine einseitige Erwärmung eines messingenen Wagebalkens um 0,1° schon einen Längenunterschied beider Hebelarme von zwei Milliontel ihres Wertes (bei 20 cm Hebellänge um 0,4 μ) herbeiführen, der zwar absolut genommen sehr klein ist, aber doch bei Belastung der Wage mit 1 kg auf jeder Seite eine einseitige Gewichtsänderung von 2 mg vortäuschen würde. Um solche Fehlerquellen zu vermeiden, sucht man sich bei physikalischen Messungen von dem Einfluß der Ungleicharmigkeit einer Wage überhaupt frei zu machen. Hierzu bedient man sich zweier Methoden.

4a) Substitutionsmethode nach Borda. Der zu wägende Körper A und das ihm entsprechende Gewicht B, letzteres nötigenfalls aus einzelnen Gewichtsstücken zusammengebaut, werden nacheinander auf die gleiche Wagschale gebracht, während die andere Seite der Wage mit einer passenden Tarabelastung, deren Größe nicht bekannt zu sein braucht, belastet ist. In beiden Fällen wird die Einstellung der Zunge auf der Wage beobachtet und es wird aus verschiedenen Zulagen zu B nach der Interpolationsmethode eine kleine Gewichtsgröße α bestimmt, welche zu B hinzuzulegen wäre, damit sich für B + α die gleiche Einstellung der Zunge ergäbe, wie für A. Dann ist

$$A = B + \alpha.$$

Die Bordasche Methode wird meist bei hydrostatischen Wägungen angewendet (über diese vgl. Näheres im Artikel „Dichte“).

4b) Vertauschungsmethode nach Gauß. Nach der Gaußschen Methode der Wägung werden die beiden zu vergleichenden Körper (Gewichtsstücke) A und B zuerst in der Stellung A links, B rechts auf der Wage gewogen; dann werden A und B miteinander vertauscht, so daß sich B links, A rechts befindet, und aufs neue eine Wägung ausgeführt. Man wendet wieder die Interpolationsmethode an und findet, daß bei

A links und (B + β) rechts

und bei

B links und (A + α) rechts

beidemale die Zunge der Wage im Gleichgewichtszustand auf denselben Teilstrich der Schale zeigen würde. Dann ist

$$A = B + \frac{1}{2}(\beta - \alpha).$$

Diese wichtige Beziehung läßt sich leicht aus den Gesetzen des zweiarmigen Hebels ableiten. Denn denkt man sich β und α so bestimmt, daß die Zunge der Wage gerade über dem Nullpunkt der Skale einsteht, d. h. mit anderen Worten, daß der Wagearm genau horizontal liegt, so daß die Gewichte senkrecht an ihm angreifen, so gilt, wenn man die Wagearme links und rechts mit b_1 und b_2 bezeichnet, gemäß den Beobachtungen

$$Ab_1 = (B + \beta)b_2$$

und

$$Bb_1 = (A + \alpha)b_2.$$

Durch Division beider Gleichungen fallen die unbekannten Hebelarme heraus; es folgt

$$\frac{A}{B} = \frac{B + \beta}{A + \alpha}$$

woraus bei kleinen erlaubten Vernachlässigungen sich die Gleichung zwischen A und B ergibt.

Aus den beiden Hebelgleichungen läßt sich noch eine weitere wichtige Folgerung

ziehen. Man findet nämlich für das Verhältnis der beiden Hebelarme

$$\frac{b_1}{b_2} = \frac{B+\beta}{A} = \frac{A+\alpha}{B} = \sqrt{\frac{(B+\beta)(A+\alpha)}{AB}}$$

woraus wieder bei erlaubten Vernachlässigungen die einfachen Beziehungen

$$\frac{b_1}{b_2} = 1 + \frac{\alpha+\beta}{2A} = 1 + \frac{\alpha+\beta}{2B}$$

folgen.

Wir wählen folgendes Beispiel. A und B seien zwei Kilogrammstücke, deren genauer Unterschied bestimmt werden soll. Dann spiele die Zunge auf den Nullpunkt der Skale ein bei

(A + 0,0342 mg) links B rechts
B links (A + 0,1468 mg) rechts,

wo die Bruchmilligrammzulagen nach der Interpolationsmethode bestimmt sind. Dann ist in obigen Bezeichnungen

$\beta = -0{,}0342$ mg $\alpha = +0{,}1468$ mg

und demnach

$$A = B + \frac{1}{2}(-0{,}0342 - 0{,}1468) \text{ mg}$$
$$= B - 0{,}0905 \text{ mg}.$$

Für das Verhältnis der Hebelarme ergibt sich

$$\frac{b_1}{b_2} = 1 + \frac{0{,}1468-0{,}0342 \text{ mg}}{1000\,000 \text{ mg}}$$
$$= 1 + 0{,}000\,000\,1125.$$

Sind b_1 und b_2, die Entfernungen der Endschneiden von der Mittelschneide, entsprechend den Verhältnissen bei den kurzarmigen Kilogrammwagen etwa 20 cm = 200 mm, so wird

$$b_1 - b_2 = 0{,}000022\,5 \text{ mm}$$
$$= 0{,}0225\ \mu.$$

Die beiden Wagearme sind also einander sehr nahe gleich, aber doch verschieden genug, um bei der Vertauschung der Gewichtsstücke von links nach rechts und umgekehrt merklich verschiedene Zulagen zu bedingen.

5. Etalonnierung von Gewichtssätzen. Ebensowenig wie Gewichtsnormale (Kilogramme) sich genau gleich ihrem Nennwert herstellen lassen, sind auch die einzelnen Gewichte eines Gewichtssatzes vollkommen richtig. Die Eichung sagt auch hier nur aus, daß die Fehler innerhalb gewisser Grenzen bleiben; für wissenschaftliche Untersuchungen ist aber wichtig zu wissen, wieviel die einzelnen Stücke von ihrem Sollwerte abweichen, um diesen Fehler bei Benutzung der Gewichtsstücke später in Rechnung ziehen zu können.

Mit der gleicharmigen Wage lassen sich nur nahezu gleiche Gewichte miteinander vergleichen. Die Gewichte innerhalb jeder Dekade müssen daher in einem derartigen Verhältnis zueinander stehen, daß es möglich ist, aus ihnen die nächsthöhere Einheit aufzubauen und daß die Stücke einzeln oder in Summen so miteinander verglichen werden können, daß der Fehler jedes einzelnen Stückes gefunden werden kann. Die Aufgabe hat große Aehnlichkeit mit derjenigen, einen Endmaßesatz zu etalonnieren (vgl. den Artikel „L ä n g e n m e s s u n g e n“ unter 10). Bei Besprechung jener Messungen ist der Fall behandelt, daß ein Endmaßesatz innerhalb einer Dekade aus den Stücken 1, 2, 3, 4 cm bestand. Die Stückelung des Gewichtssatzes 1, 2, 3, 4 g (oder eines Vielfachen hiervon nach Potenzen von 10) ist genau so zu untersuchen, wie dort; die Zufügung des Stückes 5 vermehrt die Zahl der Verknüpfungen und erhöht die Genauigkeit des Resultates. Hier mag an einem Beispiel die Ausgleichung einer Dekade von der vielfach üblichen Stückelung a_5, a_2, a_1, a_1', a_1'' von den Nennwerten 5, 2, 1, 1, 1 g behandelt werden. Durch Vergleichung der Summe mit der nächsthöheren Einheit (nominell 10 g) finde man

$$a_1+a_1'+a_1''+a_2+a_5 = 10\text{ g}+0{,}18\text{ mg} \ldots 1)$$

sowie durch innere Vergleichung

$$a_1+a_1'+a_1''+a_2-a_5 = +0{,}22\text{ mg} \;.\;.\; 2)$$

dann ist

$$a_5 = 5\text{g}-0{,}02\text{ mg} \;.\;.\;.\;.\;.\;.\; 3)$$

und $a_1+a_1'+a_1''+a_2 = 5\text{ g}+0{,}20\text{ mg} \;.\;.\; .4)$

Durch weitere Gleichungen sei gefunden

$$\left.\begin{aligned} a_1+a_1'-a_2 &= +0{,}71\text{ mg} \\ a_1+a_1''-a_2 &= +0{,}75\text{ mg} \\ a_1'+a_1''-a_2 &= +0{,}74\text{ mg} \end{aligned}\right\} \;.\;.\;.\;.\; 5)$$

Durch Addition aller drei Gleichungen erhält man

$$2a_1+2a_1'+2a_1''-3a_2 = +2{,}20\text{ mg} \;.\;.\; 6)$$

und durch Multiplikation der Gleichung 4) mit 2

$$2a_1+2a_1'+2a_1''+2a_2 = 10\text{ g}+0{,}40\text{ mg} \ldots 7)$$

Dann ergibt sich aus 6) und 7)

$$5a_2 = 10\text{ g}-1{,}80\text{ mg}$$

oder $a_2 = 2\text{ g}-0{,}36\text{ mg} \;.\;.\;.\;.\;.\; 8)$

und wenn man diesen Wert in die Gleichungen 5) einsetzt

$$a_1+a_1' = 2\text{ g}+0{,}35\text{ mg}$$
$$a_1+a_1'' = 2\text{ g}+0{,}39\text{ mg}$$
$$a_1'+a_1'' = 2\text{ g}+0{,}38\text{ mg}$$

und hieraus endlich durch Rechnung

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= 1\text{ g}+0{,}18\text{ mg} \\ a_1' &= 1\text{ g}+0{,}17\text{ mg} \\ a_1'' &= 1\text{ g}+0{,}21\text{ mg} \end{aligned}\right\} \;.\;.\;.\;.\;.\; 9)$$

Aus den Gewichtsgleichungen 1) 2) 5) ergeben sich also die unter 3) 8) und 9) aufgeschriebenen Wägungsresultate. Bei anderer Stückelung der Gewichtssätze hat die Ausgleichung natürlich in anderen Kombinationen zu erfolgen.

6. Reduktion der Wägungen auf den leeren Raum. Nach dem Archimedesschen Prinzip, von dem an anderem Orte (vgl. den Artikel „D i c h t e“) noch näher die Rede ist, verliert ein Körper, wenn man ihn in eine Flüssigkeit bringt, soviel an Gewicht, wie die verdrängte Flüssigkeit wiegt. Auch die

atmosphärische Luft, in welcher gewöhnlich alle Wägungen ausgeführt werden, ist in diesem Sinne eine Flüssigkeit und irgendein zu wägender Körper, natürlich auch die zum Wägen benutzten Gewichte, verlieren soviel an Gewicht, erscheinen also um soviel leichter als im luftleeren Raum, wie eine Luftmenge von gleichem Volumen wiegt. Dieser Gewichtsverlust ist zwar verglichen mit demjenigen bei Wägungen in Wasser nur gering, muß aber bei sehr genauen Wägungen berücksichtigt werden.

Haben der zu wägende Körper und das Gewichtsstück das gleiche Volumen, was bei homogen mit Masse erfüllten Körpern gleichbedeutend mit gleicher Dichte ist, so erleiden beide den gleichen Gewichtsverlust; sie erscheinen also auch in Luft gleich schwer. Dieser Fall liegt im allgemeinen bei der Etalonnierung eines Gewichtssatzes vor, solange die einzelnen Stücke aus dem gleichen Material verfertigt sind.

In jedem anderen Falle ist das direkte Wägungsresultat wegen des Gewichtsverlustes zu verbessern. Denn tatsächlich haben wir ja an der Wägung erst in zweiter Linie ein Interesse, insofern als die Anziehung, welche zu wägende Körper und Gewichtstücke durch die Erde erleiden, nur ein Mittel zur Bestimmung oder zur Vergleichung der beiderseitigen Massen ist, auf die es uns allein ankommt (vgl. unter 1). Die Masse aber bleibt dieselbe, ob sie sich im Wasser, in der Luft oder im luftleeren Raume befindet.

Daß man alle Wägungen auf den leeren Raum bezieht, ist ohne Bedeutung. Man tut das deswegen, weil strenggenommen das dem Volumen eines Körpers gleiche Volumen Luft nicht immer das gleiche Gewicht hat, vielmehr auf Bergeshöhen erheblich leichter ist als in der Höhe der Meeresoberfläche, auch bei höherer Temperatur nicht so schwer wiegt wie bei tieferer; sogar die Feuchtigkeit hat auf das Gewicht eines bestimmten Luftvolumens einen kleinen Einfluß. Man müßte also, um vergleichbare Verhältnisse zu schaffen, erst einen Normalzustand der Luft definieren, auf den man alles bezöge. Da ist es nun aber einfacher von der Lufterfüllung ganz abzusehen und das Vakuum als Normalzustand festzusetzen.

Man hat solche Wägungen im Vakuum tatsächlich ausgeführt. Der Bau der hierzu erforderlichen Wagen gehört zu den schönsten Leistungen der Präzisionsmechanik, insofern als solche Wagen alle die Manipulationen erlauben müssen, wie das unter 3 skizzierte und in Figur 1 abgebildete Instrument, nämlich Arretieren und Loslassen der Wage, Vertauschen der beiderseitigen Massen, Auflegen und Abheben von Zulagegewichten usw., ohne daß der Wagekasten geöffnet und das einmal hergestellte Vakuum aufgegeben werden darf. Die Wage selbst befindet sich dabei in einem luftdicht schließenden Gehäuse, in das alle Drehachsen ebenfalls luftdicht eingeführt sind.

Wägungen im Vakuum werden in neuerer Zeit kaum noch ausgeführt, seitdem man erkannt hat, daß die Gewichtsstücke hierdurch geschädigt und für längere oder kürzere Zeit unbrauchbar gemacht werden. Jedes Metallstück ist nämlich porös und birgt in seinen Poren und auf der Oberfläche Luft oder andere Gase und Feuchtigkeit, deren Menge in einer Art Gleichgewichtszustand von den Verhältnissen der Umgebung abhängig ist. Solange die Verhältnisse der Umgebung (Luftdruck, Feuchtigkeit) sich nicht allzusehr ändern, kann man die adhärierenden Schichten als unveränderlichen Bestandteil des Metallstückes (Gewichtsstückes) ansehen, die dessen Masse um einen konstanten Betrag vermehren. Bringt man aber das Gewichtsstück ins Vakuum, so lösen sich die adhärierenden Schichten ab, das Gewichtsstück büßt um diesen Betrag an Masse ein und ersetzt ihn später an der Atmosphäre erst langsam zu seinem ursprünglichen Werte. Während dieser Zeit ist das Gewichtsstück wegen seiner oft starken Veränderlichkeit zu feineren Messungen unbrauchbar.

Zwei Körper A und B, deren Volumina V_A und V_B (in Milliliter) sind, mögen im lufterfüllten Raume gleiches Gewicht ergeben haben, d. h. es war, wenn wir das Gewicht von 1 ml Luft mit s bezeichnen, in Luft

$$A - V_A s = B - V_B s.$$

Dann ist im luftleeren Raume

$$A - B = (V_A - V_B) s.$$

1 ml trockene Luft von 0° unter dem Druck von 760 mm Quecksilber wiegt

$$s_0 = 1{,}293 \text{ mg};$$

bei t^0 und h mm Druck, wenn $\alpha = 0{,}00367$ den Wärmeausdehnungskoeffizienten der Luft bezeichnet,

$$s = \frac{s_0}{1+\alpha t} \cdot \frac{h}{760},$$

wozu noch eine kleine Korrektionsgröße wegen der Feuchtigkeit der Luft hinzutritt.

Das folgende Beispiel möge einen Begriff von der möglichen numerischen Größe der Reduktion auf den luftleeren Raum geben. Wir nehmen an, A und B seien Kilogramme aus Aluminium oder Platin, so ist $V_A = 370$ ml, $V_B = 46$ ml, also wird bei 0° und 760 mm Druck die Reduktion auf den leeren Raum

$$(V_A - V_B) s = (370 - 46) . 1{,}293 \text{ mg} = 419 \text{ mg}$$

also nahezu ½ g oder ½ Promille der zu vergleichenden Gewichte.

7. Robervalsche Wage. Die Robervalsche Wage ist ebenfalls eine gleicharmige

Hebelwage, welche aber von dieser äußerlich sehr verschieden ist, namentlich insofern als sich die Last oberhalb der Drehpunkte des Wagebalkens befindet. Figur 2 gibt

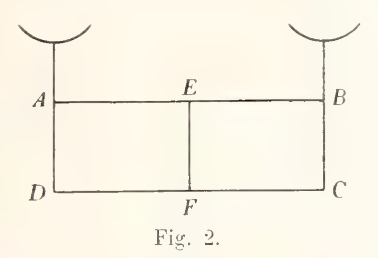


Fig. 2.

eine schematische Ansicht der Wage, welche als Tafelwage im Krämerladen und im Haushalte benutzt wird. Die Robervalsche Wage besitzt statt eines Wagebalkens deren zwei, AB und DC, welche in den Mitten E und F drehbar gelagert sind. Zwischen AD und BC sind Querverbindungen vorgesehen, die in ABCD in Scharnieren mit AB und DC verbunden sind; die Querverbindungen AD und BC tragen über A und B nach oben hinaus verlängert die Wagschalen.

Bei unbelasteter Wage und bei Belastung im Gleichgewichtszustand ist ABCD ein Rechteck, welches bei einseitigem Uebergewicht in ein Parallelogramm übergeht. Wie groß aber auch der Ausschlag der Wage ist, stets bleiben AD und BC senkrecht; die Lasten wirken also immer an gleichen Hebelarmen. Bei der früher beschriebenen zweiarmigen Hebelwage gewöhnlicher Form war es gleichgültig, auf welche Stelle der Wagschale die Last aufgesetzt wurde; denn dank ihrer Aufhängung über eine Schneide stellte sich die Wagschale stets so, daß der gemeinsame Schwerpunkt von Schale und Last unter dem Unterstützungspunkt lag. Bei der Robervalschen Wage ist das gleiche Ziel durch den Doppelhebel erreicht. Würde die Last etwa rechts unsymmetrisch auf die Schale aufgesetzt, so würde sie zwar BC um B und C zu drehen suchen, was aber wegen der vorhandenen Scharniere nicht möglich ist. Es würde lediglich eine der ganzen Größe des Gewichts gleiche resultierende Kraft übrigbleiben, welche längs BC senkrecht nach unten wirkt. Die Robervalsche Wage in der gewöhnlich gebrauchten Form ist keiner großen Genauigkeit fähig. Sie ist dadurch verbessert worden, daß man die beiden Wagebalken um Schneiden drehbar lagerte und auch die Scharniere bei ABCD durch Schneiden ersetzte; aber auch in dieser Anordnung steht sie der unter 3 besprochenen gleicharmigen Hebelwage nach.

8. Ungleicharmige Hebelwagen. Auch die ungleicharmigen Wagen erlauben bei weitem nicht, die Genauigkeit zu erreichen, wie die gleicharmige Hebelwage. Man unterscheidet wesentlich drei Formen derselben: die Schnellwage, die Briefwage, die Dezimal- oder Brückenwage.

8a) Die Schnellwage ist ein gerader Hebel, an dessen kürzerem Hebelarm die Last an einem Haken aufgehängt wird. Ueber den längeren Hebelarm bewegt sich ein Laufgewicht, dessen Stellung an einer Skala abgelesen werden kann. Das Laufgewicht wird so weit verschoben, bis der Hebel, den man meist mit einem Handgriff an der Drehachse faßt, horizontal steht. Ist a der kürzere, b der längere Hebelarm, L die Last und G das diese ausgleichende Gewicht, so gilt nach den Hebelgesetzen

$$a.L = b.G \text{ oder } L = \frac{b}{a}.G.$$

Die Teilung ist gewöhnlich nicht nach metrischem Maße, sondern so ausgeführt, daß man an ihr direkt die Größe der Last in Kilogramm ablesen kann. Es ist leicht einzusehen, daß die Teilung nach Kilogrammen auf dem längeren Wagearm gleichmäßig sein muß, d. h. daß einer doppelten, dreifachen usw. Last auch eine doppelte, dreifache usw. Entfernung des Laufgewichts von der Drehachse entsprechen muß.

. 7b) Die Briefwage ist ein ungleicharmiger Winkelhebel, dessen kurzer, die Last tragender Schenkel nahezu horizontal gerichtet ist; die Last wirkt auf eine Stange, welche durch eine Parallelogrammführung, ähnlich wie bei der Robervalschen Wage, stets in vertikaler Lage gehalten wird. Der längere Arm des Winkelhebels ist bei Nichtbelastung der Wage nahezu nach unten gerichtet und steht bei der Maximalbelastung fast horizontal; an seinem Ende ist er mit einem passenden Gewicht beschwert. Bei zunehmender Belastung wird die Horizontalprojektion des kürzeren (Last-) Hebelarmes nur wenig verändert, das Moment = Kraft × Hebelarm wächst also nahezu proportional der Kraft d. h. der Belastung. Am längeren Hebelarm bleibt die Kraft, das beschwerende Gewicht, stets das gleiche, dagegen wächst die Horizontalprojektion des Hebelarmes von etwa Null bis zur Länge des längeren Armes des Winkelhebels; das Moment ist also hier der Horizontalprojektion des Hebelarmes proportional. Zu einer bestimmten Belastung der Wage gehört also eine bestimmte Stellung des längeren Hebelarmes, welche an einer mit ihm verbundenen Kreisbogenteilung abgelesen werden kann. Die Teilung zeigt direkt die Belastung an, ihre Graduierung kann nur auf empirischem Wege vorgenommen werden.

8c) Die Brückenwage (Dezimalwage, Zentesimalwage) ist eine Kombination von ungleicharmigen Hebeln, welche teilweise

im dezimalen Verhältnis (1:10 oder 1:100) stehen. Eine Kombination von mehreren Hebeln ist deswegen gewählt, um die Last nicht an Wagschalen aufhängen zu müssen, sondern die Möglichkeit zu haben, sie an beliebiger Stelle auf eine Unterlage, die Brücke, aufsetzen zu können. Die Brücke kann man nach Bedarf so groß ausbilden, daß sie Lasten von erheblicher Ausdehnung, z. B. belastete vierrädrige Fuhrwerke aufzunehmen vermag. Figur 3 stellt eine Dezimalwage schematisch

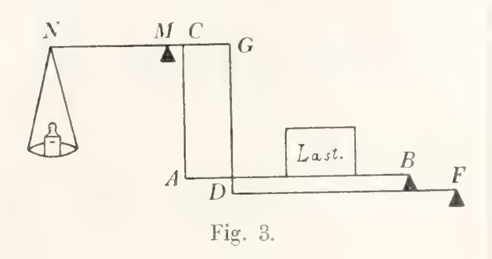


Fig. 3.

dar. Die Last ruht auf der Brücke AB, deren einer Endpunkt A mittels einer Stange AC an C, d. h. an dem kürzeren Arm des Wagebalkens angreift. Das andere Ende B der Brücke ruht auf einer zweiten Brücke DF, die in F drehbar gelagert ist und in D ebenfalls mittels einer Stange an dem entfernter liegenden Punkte G des kürzeren Wagearms wirkt.

Alle Drehachsen (A, B, C, D, F, G) sind zwecks guter Definition der Hebellängen durch Schneiden gebildet. Die einzelnen Hebelarme sind so abgeglichen, daß sich

$$MC : MG = BF : DF = x : y$$

verhält, wo x:y ein beliebiges Verhältnis bezeichnet, das häufig gleich 1:5 gewählt wird. Setzt man nun eine Last L auf die Brücke AB, so wird ein Teil der Last L_1 auf A, ein anderer Teil L_2 auf B wirken, derart, daß $L_1+L_2=L$ ist. Der Teil L_1 wirkt mittels der Zugstange AC direkt auf den Punkt C. Der Teil L_2 wirkt auf die Brücke DF, welche ja ein einarmiger, in F drehbarer Hebel ist; man kann also nach bekannten Hebelgesetzen die Kraft L_2, die auf B wirkt, durch eine auf D wirkende ersetzen, welche im Verhältnis der Hebelarme BF:DF oder x:y kleiner ist, d. h. also durch eine Kraft $L_2\frac{x}{y}$, die an D oder mittels der Stangenübertragung an G angreift. An Stelle der Kraft $L_2\frac{x}{y}$ kann man schließlich wieder eine Kraft $L_2\frac{x}{y}\cdot\frac{y}{x}=L_2$ in C wirkend denken. In C ist somit die ganze Last $L_1+L_2=L$, die auf die Brücke AB aufgesetzt war, vereinigt. Man hält ihr das Gleichgewicht durch eine mittels der Wagschale an N angreifende, aus Gewichten gebildete Kraft, welche im Verhältnis der Wagearme MC:NM kleiner ist. Je nachdem also MC:NM im Verhältnis 1:10 oder 1:100 stehen, ist zur Herstellung des Gleichgewichts der zehnte oder hundertste Teil der Last nötig; je nach dem gewählten Hebelverhältnis wirkt also die Wage als Dezimal- oder als Zentesimalwage.

9. **Federwage.** Unter 2 wurde hervorgehoben, daß zwei gleiche Massen von einer dritten Masse in der gleichen Entfernung mit derselben Kraft angezogen werden, und es wurde dadurch ein Mittel gefunden, zwei Massen durch ihre Wirkung als Gewichte miteinander zu vergleichen. Als dritte anziehende Masse wurde die Erde, als Indikator für gleiche Anziehung der gleicharmige Hebel, und zwar in der Form der gleicharmigen Wage angegeben. Daß die beiden Massen, welche durch ihre Wirkung als Gewichte verglichen werden sollen, sich in gleicher Höhe befinden, ist sehr wesentlich. Denn befinden sich die beiden gleichen Massen nicht mehr in der gleichen Entfernung vom Erdmittelpunkt, so werden sie von der Erde verschieden stark angezogen, haben also verschiedenes Gewicht. Die Erfahrung hat gelehrt, daß wenn eine Masse von der Erdoberfläche in die Höhe entfernt wird, sich ihr Gewicht um rund 0,3 mg für 1 kg und 1 m Höhenerhebung verringert. Dieser Gewichtsverlust tritt aber nicht in die Erscheinung, wenn zwei an der gleicharmigen Hebelwage im Gleichgewicht befindliche Massen beide um dieselbe Höhe von der Erdoberfläche entfernt werden. Eine belastete im Gleichgewicht befindliche Wage wird also — natürlich bezogen auf den luftleeren Raum (vgl. unter 6) — im Gleichgewicht bleiben, wohin man sich auch mit der Wage begibt, am Pol und am Aequator, auf einem hohen Berge oder auf der Meeresoberfläche; ja selbst wenn man sich mit der Wage auf den Mond oder die Sonne begeben könnte, würde das Gleichgewicht erhalten bleiben.

Man kennt noch einen anderen Indikator für die Anziehung einer Masse durch die Erde, das ist die gespannte oder zusammengedrückte Feder, für das Verständnis am bequemsten in der Form der Spiralfeder gedacht. Figur 4 zeigt die Jollysche Federwage, die den Fall der gespannten Feder verkörpert und deren Prinzip oft zur Konstruktion von Briefwagen verwendet wird. Die zusammengedrückte Feder findet man vielfach bei der im Haushalt benutzten Tellerwage. Die Last befindet sich dann oberhalb der Spiralfeder, welche, um das seitliche Ausweichen zu verhindern, in einer Büchse geführt wird; mit dem oberen Ende der Spiralfeder ist ein Zeiger verbunden,

der über einer Skale spielend angibt, wieweit die Feder zusammengepreßt ist.

Will man die Federwage nur zu Massenvergleichungen benutzen, so beobachtet man die Verkürzung oder die Verlängerung, d. h. die Längsdeformation der Feder unter der Wirkung der unbekannten Last, entfernt diese dann und belastet die Wage mit bekannten Gewichten so lange, bis derselbe Grad der Längsdeformation der Feder erreicht ist. Dann ist die unbekannte Masse gleich der Masse der Gewichtsstücke. In dieser Anwendung leistet — natürlich von der Genauigkeit abgesehen — die Federwage als Indikator genau das gleiche wie die gleicharmige Hebelwage; insbesondere ist auch hier das Resultat der Gewichts- und indirekt der Massenvergleichung dasselbe, wo immer die Wägungen ausgeführt werden.

Fig. 4.

Man hat aber gefunden, daß die Federwage in bequemer Weise gestattet, Massen- und Gewichtsmessungen vorzunehmen, ohne daß erst jedesmal die unbekannte Masse in der oben beschriebenen Weise durch bekannte Gewichtsstücke austariert werden muß. Diese Verwendung der Federwage beruht auf dem bekannten Elastizitätsgesetz, daß die Längsdeformationen von Spiralfedern innerhalb gewisser Grenzen, d. h. bei nicht zu großer Belastung, der deformierenden Kraft proportional sind. Man braucht also eine Federwage nur ein für allemal zu eichen, indem man für ein bekanntes Gewicht bei der gezogenen Feder die Verlängerung, bei einer gedrückten die Verkürzung oder bei Zeigerübertragung den Ausschlag des Zeigers relativ zu einer Skale bestimmt und die Skale zwischen der Ablesung der so maximal belasteten und der unbelasteten Wage proportional teilt. Mit einer solchen Eichung zeigt dann aber die Wage strenggenommen nur richtig, solange sie ihren Ort auf der Erdoberfläche nicht ändert. Denn ein und dieselbe Masse wird ja auf den verschiedenen Stellen der Erdoberfläche von der Erde verschieden stark angezogen und übt dann natürlich auf die Spiralfeder eine verschieden starke deformierende Kraft aus. Wollte man z. B. mit einer Federwage, welche im hohen Norden geeicht ist, Wägungen am Aequator ausführen, so würde man dort Werte für die Gewichte, oder für die Massen, erhalten, die um etwa ½ % zu klein sind. Ebenso würde man mit einer im Meeresniveau geeichten Federwage auf Bergen zu kleine Gewichte finden, die um so kleiner sind, je höher man mit der Wage hinaufgegangen ist.

10. Poggendorffsche Wage. Wir wollen versuchen, das unter 9 Gesagte durch eine kurze theoretische Ueberlegung unserem Verständnis noch etwas näher zu bringen. Wir denken uns zwei gleiche Massen, m_1 und m_2. Diese Massen haben die Gewichte m_1g_1 und m_2g_2, wo g_1 und g_2 jedesmal die Beschleunigung ist, welche ein frei fallender Körper dort, wo sich die Masse gerade befindet, in jeder Sekunde durch die Anziehungskraft der Erde erleidet. Der Wert von g ist am Aequator 978,1 cm/sec², am Pol 983,2 cm/sec², an anderen Punkten der Erdoberfläche nimmt g dazwischenliegende Werte an, bei Erhebung in die Höhe wird g kleiner usw.

Befinden sich die beiden gleichen Massen m_1 und m_2 je auf einer Seite einer gleicharmigen Wage, so ist dort an derselben Stelle der Erde $g_1=g_2$ also auch $m_1g_1=m_2g_2$, d. h. die beiden Massen haben auch das gleiche Gewicht. Dieser Zustand ändert sich sofort, sobald man die Massen in eine verschiedene Höhenlage bringt. Verwirklichen kann man diesen Fall z. B. dadurch, daß die gleicharmige Wage auf der einen Seite zwei Wagschalen besitzt, von denen die eine, die untere, mit einem langen Draht an die andere obere gehängt ist. Bringt man dann etwa m_2 aus der oberen in die untere Wagschale, so wird g_2 und damit auch m_2g_2 größer, die beiden Massen haben also nicht mehr gleiches Gewicht, vielmehr ist das Gewicht der Masse m_2 größer als das der Masse m_1 geworden. Umgekehrt kann man aus gleichem Gewicht $m_1g_1=m_2g_2$ nur dann auf gleiche Masse schließen, wenn $g_1=g_2$ ist, andererseits stehen z. B. bei Gebrauch derselben Federwage an verschiedenen Stellen der Erdoberfläche die Massen im umgekehrten Verhältnis der Beschleunigungen $m_1 : m_2 = g_2 : g_1$.

Diese Betrachtungen mögen auf eine Vorrichtung angewendet werden, welche man nach ihrem Erfinder die Poggendorffsche Wage nennt. Von den verschiedenen Formen der Vorrichtung soll nur die folgende besprochen werden. An einem gewöhnlichen gleicharmigen Hebel ist auf der rechten Seite eine Rolle aufgehängt, um die Rolle wird ein Faden geschlungen, der an beiden Enden mit den Massen m_1 und m_2 belastet wird; m_1 und m_2 sollen jetzt nicht mehr gleich sein, vielmehr mag $m_1 > m_2$ angenommen werden. Solange der Faden infolge einer vorgesehenen Hemmung sich noch nicht über die Rolle bewegen kann, hat man, um das Gleichgewicht herzustellen, die linke Seite der Wage ebenfalls mit m_1+m_2 zu belasten.

Wir denken uns jetzt die Hemmung beseitigt. Alsbald werden sich die Massen m_1 und m_2 rechts in Bewegung setzen, m_1 wird sinken und dabei m_2 in die Höhe ziehen.

Wir wollen die Massen auf der rechten Seite als ein fallendes System betrachten, so ist klar, daß von dem System die gleiche Wirkung ausgeübt wird, wie wenn die Masse m_1-m_2 sich abwärts bewegte. Die Beschleunigung dieses Falles γ ist aber nicht die des freien Falles g, sondern sie ist gegen diese verlangsamt, weil ja durch die fallende Masse m_1-m_2 nicht diese selbst, sondern die größere m_1+m_2 in Bewegung gesetzt werden muß; eine einfache Ueberlegung lehrt, daß

$$\gamma=\frac{m_1-m_2}{m_1+m_2}\cdot g$$

ist.

Die rechte Seite wird somit um das fallende Gewicht

$$(m_1-m_2)\gamma=\frac{(m_1-m_2)^2}{m_1+m_2}\,g$$

erleichtert, was bei der gewöhnlichen Beschleunigung g einem Verlust an Masse um

$$\frac{(m_1-m_2)^2}{m_1+m_2}$$

auf der rechten Seite gleichkommt. Sobald die Bewegung der Massen m_1 und m_2 also auf der rechten Seite eingeleitet ist, wird die Wage nicht mehr im Gleichgewicht bleiben, vielmehr wird die linke Seite schwerer erscheinen und niedersinken. Um das Gleichgewicht wieder herzustellen müßte man die rechts scheinbar verschwundene Masse $\frac{(m_1-m_2)^2}{m_1+m_2}$ auf der linken Seite wirklich entfernen. Die hier gezogenen Schlußfolgerungen sind durch Versuche bestätigt worden.

11. Verwendung des Wageprinzips in verschiedenen Gebieten der Physik. Die gleicharmige und ungleicharmige Wage findet in fast allen Gebieten der Physik in mannigfachen Formen Anwendung, um Kräfte der verschiedensten Art zu messen. Es kann natürlich nicht unsere Aufgabe sein, hierauf im einzelnen einzugehen; immerhin wird es Interesse bieten einige dieser Anwendungsmöglichkeiten kurz zu besprechen. Wir beginnen mit einem Fall, wo eine Wage ähnlich ihrer eigentlichen Bestimmung verwendet wird, um Gewichte zu messen; es folgen dann Wagen zur Messung elektrostatischer, elektrodynamischer und magnetischer Kräfte.

11a) Laufgewichtsbarograph. Eine der Formen des vom verstorbenen Meteorologen Sprung angegebenen, von R. Fueß in Steglitz gebauten Laufgewichtsbarographen ist in Figur 5 nach der Zeitschrift für Instrumentenkunde 15, S. 133—146, 1895 wiedergegeben. Der Luftdruck wird auf einer Schreibtafel T in rechtwinkeligen Koordinaten mittels der Feder F als Funktion der Zeit aufgezeichnet. Die hierzu nötige, mit der Zeit gleichmäßig fortschreitende Verschiebung der Tafel geschieht durch das Hauptuhrwerk des Instrumentes, für welches die Schreibtafel als treibendes Gewicht dient. Die horizontale Koordinate der Kurve stellt die Größe des Luftdruckes dar. Sie ändert sich mit der horizontalen Verschiebung der Schreibfeder selbst, deren Bewegung durch die folgende Einrichtung des Instrumentes erreicht wird.

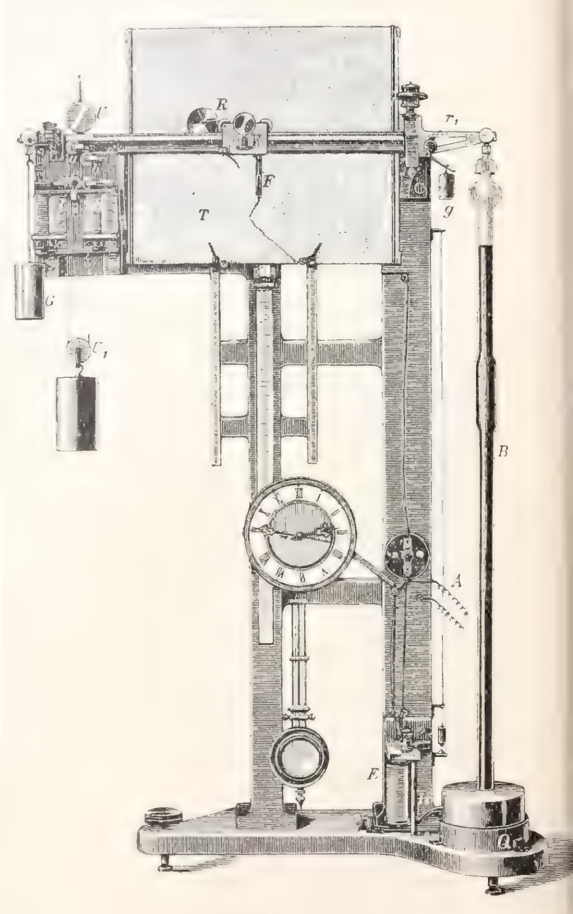


Fig. 5.

Das Barometerrohr B, welches unten in ein weiteres Quecksilbergefäß Q eintaucht, ist an dem kurzen Arm einer ungleicharmigen Wage aufgehängt und wird durch ein konstantes Gewicht G am Ende des langen Armes und ein auf dem letzteren verschiebbares Laufgewicht R ausbalanziert. Die Verschiebung des Laufgewichts erfolgt durch einen mit ihm zwangsfrei gekuppelten, auf einer horizontalen, festen Schiene laufenden Wagen V, der gleichzeitig die Schreibfeder F trägt. Dieser Wagen ist an den beiden Enden eines über die Rollen r und r_1 mittels

des Gewichts g gespannten, geriffelten Bandes befestigt (a und b sind Leitrollen), so daß beim Drehen der Rolle r je nach dem Sinne der Drehung eine Bewegung des Wagens nach der einen oder anderen Richtung zustande kommt. Die Drehung von r wird durch zwei Friktionsrädchen bewirkt, welche von einem Nebenuhrwerk (Pendelstange U, Triebgewicht U_1) dauernd mit gleichmäßiger Geschwindigkeit in entgegengesetztem Sinne gedreht werden. Die das Band tragende Rolle r sitzt dabei auf dem nach Art einer Wippe über zwei Elektromagneten I und II spielenden Anker; je nachdem der eine oder der andere derselben in Wirksamkeit tritt, wird die Rolle gegen das eine oder das andere Friktionsrädchen gedrückt, und dadurch der

Fig. 6.

Wagen V und mit ihm die Feder und das Laufgewicht nach links oder rechts verschoben. Die Betätigung der Elektromagnete erfolgt durch einen Kontakt, der bei der Abwärtsbewegung des langen Wagearms geschlossen wird.

11b) Elektrometrische Wage (W. Thomson, Kirchhoff). Eine von einem sogenannten Schutzring umgebene Scheibe von der Größe f qcm ist an einer Wage aufgehängt (Fig. 6); Scheibe und Schutzring haben das elektrostatische Potential V. Der Scheibe gegenüber, unter ihr, befindet sich im kleinen Abstande a eine zweite fest gelagerte ebene Platte von größerer Ausdehnung, welche zum Potential V_0 geladen sei. Infolge der zwischen Scheibe und Platte bestehenden Potentialdifferenz $V-V_0$ ziehen sich beide an und die bewegliche Scheibe wird deshalb einen Zug auf die Wage ausüben, der durch ein Gewicht pg äquilibriert werden kann. Dann findet man, wie in der Elektrostatik gelehrt wird, die Potentialdifferenz in absoluten elektrostatischen Einheiten

$$V - V_0 = a\sqrt{\frac{8\pi \cdot 981\,p}{f}}.$$

Der Zahlenfaktor 981 bedeutet die Beschleunigung der Schwere (vgl. unter 10).

11c) Elektrodynamische Wage. Die elektrodynamische Wage dient dazu, die Kraft, mit welcher zwei vom elektrischen Strom durchflossene Spulen sich anziehen oder abstoßen, durch Wägung zu finden. Eine von Lord Rayleigh angegebene, später mehrfach modifizierte Anordnung ist der unter 11b skizzierten elektrometrischen Wage sehr ähnlich; von den beiden Spulen ist die eine fest, die andere ist beweglich an der einen Seite einer gleicharmigen Wage aufgehängt. Die bei Stromschluß aus der Gleichgewichtslage herausgedrehte Wage wird durch Zulage von Gewichten wieder in diese zurückgebracht. Die Bedeutung der elektrodynamischen Wage beruht darin, daß es mit ihrer Hilfe möglich ist, die elektrischen Einheiten absolut zu bestimmen.

Eine andere Form der elektrodynamischen Wage ist von Helmholtz angegeben und in der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt ausgearbeitet; sie ist in Figur 7 dargestellt (vgl. Zeitschr. f. Instrumentenkunde 17, S. 101, 1897). Mit dieser Wage wird nicht die anziehende oder abstoßende Kraft

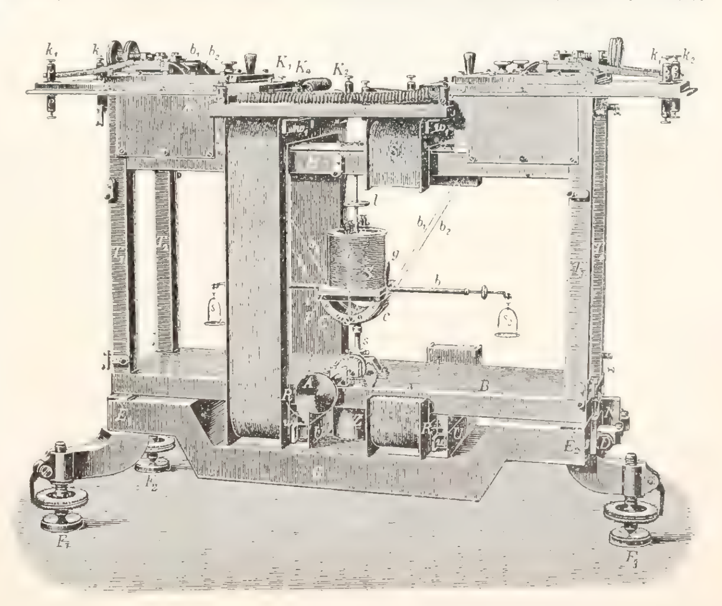


Fig. 7.

zweier parallel gerichteter Spulen, sondern das Drehmoment zwischen zwei aufeinander senkrechten Spulen bestimmt. Die bewegliche Spule S steht auf dem Balken b der Wage, einem Aluminiumstabe, der sich nach den Enden zu verjüngt und in der Mitte zu

einer quadratischen horizontalen Platte p ausgebildet ist. Die sonst bei Wagen übliche Schneide, auf der der Wagebalken ruht, ist hier durch einen Zylinder C ersetzt, der auf zwei Bändern b_1 und b_2, den Stromzuführungen zur beweglichen Platte, rollt. Das ganze bewegliche System kann durch eine unter ihm angebrachte Arretierungsvorrichtung mittels des Handgriffes A angehoben und festgelegt werden. Die feste Spule besteht aus zwei gleichen Hälften S_1 und S_2 in 8 cm Abstand voneinander, welche den Wagekasten eng umschließen. In der Figur 7 sind zur besseren Durchsicht Teile der Spule S_2 fortgelassen.

11 d) Magnetische Wage (nach du Bois). Ein auf seine magnetischen Eigenschaften zu untersuchender Stab wird, von der Magnetisierungsspule umgeben, zwischen eiserne Backen eingespannt (Fig. 8). Ueber

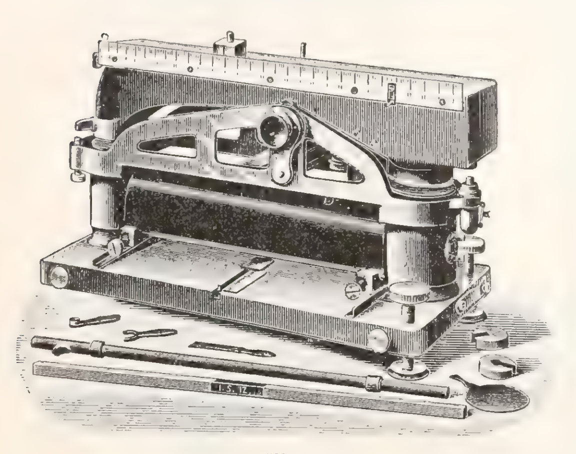


Fig. 8.

den Backen spielt ein halbkreisförmiger ungleicharmiger Wagebalken. Die von den beiden Enden des magnetischen Stabes ausgeübten gleichen Anziehungskräfte wirken auf die Enden des Wagebalkens und veranlassen den längeren (linken) Arm sich zu senken. Diese Wirkung wird durch Laufgewichte aufgehoben, deren Stellung auf der horizontalen, mit dem halbkreisförmigen Wagebalken verbundenen Skale ein Maß für die magnetische Induktion des Stabes liefert. Die magnetische Wage muß durch Körper mit bekannten magnetischen Eigenschaften geeicht weiden.

Literatur. ***Felgentraeger***, *Theorie, Konstruktion und Gebrauch der feineren Hebelwage. Leipzig und Berlin 1907.* — ***Grumnach***, *Die physikalischen Erscheinungen und Kräfte, ihre Erkenntnis und Verwertung im praktischen Leben. Leipzig 1899.* — ***Guillaume***, *La convention du mètre et le Bureau international des Poids et Mesures. Paris 1902.* — ***Derselbe***, *Les récents progrès du système métrique. Proc.-Verb. du Com. intern. (2)* ***5***, *21 S., 1909; (2)* ***6***, *53 S., 1911.* — ***Scheel***, *Grundlagen der praktischen Metronomie. Braunschweig 1911.* — ***Weinstein***, *Physikalische Maßbestimmungen. Berlin 1886/88.* — *Ferner viele Abhandlungen in den Procès-Verbaux und Travaux et Mémoires du Bureau international des Poids et Mesures (Marek, Thiesen), in den Wissenschaftlichen Abhandlungen der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt und denen der Kaiserl. Normal-Eichungs-Kommission, sowie in der Zeitschr. f. Instrumentenkunde.*

K. Scheel.

Materie.

1. Begriff der Materie. 2. Struktur der Materie. 3. Die Atome. 4. Die ungeordneten Bewegungen der Moleküle. 5. Die Struktur der Atome.

1. Begriff der Materie. Wir kommen zu dem Begriff der Materie, indem wir die Empfindungen unserer äußeren Sinne, die nicht von unserem Wollen abhängig sind und somit von einer von uns unabhängigen Wirklichkeit zeugen, aus uns hinausprojizieren und die einzelnen Empfindungen, wie beispielsweise: hell, farbig, warm, glatt, hart usw., als Prädikate eines Subjektes setzen, das wir dann als materiellen Körper bezeichnen.

Kurz gesagt, ist also die Materie das Wirkliche, sofern es den in einen Begriff gefaßten Gegenstand unserer äußeren Sinne bildet. Die Eigenschaften der Materie sind nichts anderes wie die direkten Wahrnehmungen unserer äußeren Sinne, sei es der uns angeborenen Sinne allein, sei es der durch künstliche Apparate, wie Mikroskop, Thermometer, Galvanometer und all die anderen physikalischen Instrumente verschärften Sinne.

Da die Naturwissenschaft die systematische, begriffliche Darstellung der Wahrnehmungen unserer äußeren Sinne ist, so können wir sie auch als die Wissenschaft von der Materie bezeichnen, und mit dem Wort „Materie" haben wir eigentlich auch zugleich schon das Thema der gesamten Naturwissenschaft kurz und genau angegeben.

2. Struktur der Materie. Es ist eine alte Frage, ob ein materieller Körper den von ihm eingenommenen Raum ganz kontinuierlich und gleichförmig erfülle, oder ob er noch eine feine Struktur habe, die unseren Sinnen bei oberflächlicher Betrachtung zunächst verborgen bleibt und sich erst bei einer gründlicheren Untersuchung herausstellt. Viele Körper zeigen schon im groben eine Struktur. Die Teile der Organismen sind aus Zellen zusammengesetzt; viele Gesteine, wie beispielsweise der Sandstein, bestehen aus Körnern, die miteinander verkittet sind. Im allgemeinen können wir solche zusammen-

gesetzten Körper, wie Knochen, Holz, Papier, Sandstein usw., im großen ganzen genau so ansehen, als ob sie homogen wären und den Raum kontinuierlich erfüllten.

Die Molekulartheorie behauptet nun, daß selbst die scheinbar ganz klaren Stoffe, die uns bei genauer Betrachtung wirklich homogen zu sein scheinen, z. B. die einzelnen Quarzkörner des Sandsteins, oder die einzelnen Kristalle im Granit, oder das Wasser, die Luft usw. usw., noch aus Körnchen aufgebaut sind, freilich äußerst kleinen, die man Moleküle nennt und die durch ein andersartiges Zwischenmedium, das Vakuum, zu dem ganzen Körper verbunden sind. Ein einzelnes Molekül ist also physikalisch etwas ganz anderes, als der zusammengesetzte sichtbare materielle Körper, gerade so, wie ein einzelnes Sandkorn ganz andere physikalische Eigenschaften hat, als der aus den Körnern gebildete Sandstein. Wenn man aber Form und Eigenschaften der Moleküle und außerdem ihre Lagerung und Verkittung genau kennte, so müßten sich daraus alle Eigenschaften des materiellen Körpers berechnen lassen.

Die Molekulartheorie ist ursprünglich deswegen der scheinbar einfacheren Kontinuitätstheorie der Materie entgegengesetzt worden, weil sich die meisten physikalischen und chemischen Vorgänge mit ihrer Hilfe weit bequemer und anschaulicher darstellen lassen. Noch bis in die neueste Zeit findet man Aeußerungen, daß man im Grunde nach Belieben zwischen beiden Theorien wählen könne, weil sie über das hinausgingen, was sich sinnlich wahrnehmen läßt. Das ist aber nicht richtig. Beide Theorien haben ihre ganz bestimmten Konsequenzen, die sich experimentell prüfen lassen, und der experimentelle Befund entscheidet, wie wir sehen werden, für die Molekulartheorie.

Wenn die Kontinuitätstheorie richtig wäre, so müßte man aus jedem Stoff beliebig dünne Schichten herstellen können, in denen der Stoff noch genau ebenso zusammenhängend ist und überhaupt genau dieselben Eigenschaften zeigt, wie in dicken Schichten. Nun lassen sich praktisch wirklich außerordentlich dünne Schichten gewinnen, beispielsweise, indem man sehr kleine Tröpfchen Oel auf große Wasseroberflächen bringt, wo sie sich zu gleichmäßigen feinen Oelhäuten ausbreiten, oder indem man auf einer sauberen Metalloberfläche (am besten Platin) mit einem äußerst schwachen elektrischen Strom durch Elektrolyse einen feinen Ueberzug von einem anderen Metall herstellt. Man hat bestimmte experimentelle Kriterien, um zu entscheiden, ob die so gewonnene Oelhaut oder Metallhaut gleichmäßig zusammenhängend ist, und Versuche von Oberbeck und von Röntgen haben ergeben, daß dies der Fall ist, so lange die Dicke der Haut größer ist als 1 Millimikron (1 $\mu\mu$ = 1 Millionstel Millimeter). Sobald aber die Haut wesentlich dünner wird, als 1 $\mu\mu$, hört sie in allen Fällen auf, ein zusammenhängendes Ganze zu bilden, die Kontinuitätstheorie der Materie kann also nicht richtig sein. Aus den Experimenten mit dünnen Häuten schließt man, daß der Durchmesser der meisten Moleküle ungefähr einige Zehntel Millimikron beträgt (Literatur 1).

Ein anderes Kriterium zur Entscheidung zwischen beiden Theorien liefert das optische Verhalten der Materie. Ein Körper, der den Raum kontinuierlich erfüllt, muß unbedingt vollkommen klar sein, ein Körper dagegen, der kleine Partikelchen, verbunden durch ein andersartiges Zwischenmedium, enthält, muß trübe sein, weil alle Partikelchen einzeln Licht reflektieren. Wenn also die Molekulartheorie richtig ist, muß alle Materie etwas trübe sein. Es ist nicht leicht, diese Frage experimentell zu entscheiden, allein schon deswegen, weil es äußerst schwierig ist, einen Stoff wirklich ganz rein ohne trübende Fremdkörperchen zu bekommen. Wahrscheinlich würde jeder Stoff, wenn man ihn ganz sauber herstellen könnte, mit den uns im Laboratorium zur Verfügung stehenden Mitteln keine bemerkbare Trübung zeigen. Das an kleinen trübenden Partikelchen diffus zerstreute Licht nimmt mit dem Durchmesser der Partikelchen zugleich an Intensität rapide ab, und wie wir gerade gesehen haben, sind die Moleküle sicher winzig klein. Im Laboratorium wird man daher voraussichtlich niemals entscheiden können, ob die äußerst schwache Trübung, die den winzigen Molekülen entspricht, vorhanden ist oder nicht. Nun haben wir aber in der Natur ein Beispiel, wo ein außergewöhnlich intensives Licht einen durchsichtigen Körper von kolossalen Dimensionen erfüllt, so daß also eine ungeheure Anzahl von Molekülen zu dem diffus zerstreuten Licht beitragen kann, das ist die vom Sonnenlicht erfüllte Atmosphäre. Diese gibt nun tatsächlich immer, auch wenn sie ganz rein ist, ein diffus zerstreutes Licht, das Licht des blauen Himmels. Sorgfältige Untersuchungen haben ergeben, daß dies genau dieselbe Beschaffenheit hat, wie Licht, das an ganz kleinen Partikelchen zerstreut wird (vgl. den Artikel „Atmosphärische Optik“). Wenn man nun bedenkt, daß die Helligkeit des vollkommen klaren Himmels regelmäßig ziemlich gleich stark ist, so ist es wenig wahrscheinlich, daß es vorwiegend zufällige Beimengungen der Luft, wie Staub, Bazillen u. dgl. seien, die die Trübung hervorrufen, weil eine solche zufällige Trübung außer-

ordentlich wechselnd sein müßte. Es ist also im höchsten Grade wahrscheinlich, daß das Himmelslicht die Trübung anzeigt, die der Luft an sich wegen ihrer molekularen Struktur zukommt. Wir haben danach das Licht des Himmels als ein Argument für die Molekulartheorie gegen die Kontinuitätstheorie der Materie anzusehen. Lord Rayleigh, dem wir diese Erklärung des Himmelslichtes verdanken, hat aus der Helligkeit des Himmels berechnet, wie fein die Zerteilung der Luft in Moleküle sein müsse, um dieses Licht zu geben. In Luft von 0^0 und 760 mm Druck kommen danach auf jeden Kubikzentimeter N = 24,7 Trillionen Moleküle. Da bei der Berechnung nicht berücksichtigt ist, daß infolge der unvermeidlichen Staubpartikelchen in der Luft die Intensität des zerstreuten Lichtes zu groß gefunden wird, so ist die berechnete Zerteilung jedenfalls noch nicht ganz so fein, als die wirkliche, die Zahl 24,7 Trillionen ist demnach sicher noch etwas zu klein (Literatur 2).

In neuerer Zeit ist es sogar gelungen, einzelne Moleküle für sich sichtbar zu machen. Wenn Luft oder ein anderes Gas elektrisch leitend geworden ist, was z. B. durch die Einwirkung von Röntgenstrahlen und gewissen anderen Strahlenarten eintritt, so erklärt die Molekulartheorie das dadurch, daß einzelne Moleküle des Gases positive Ladungen, einige andere Moleküle negative Ladungen angenommen haben. Die geladenen Moleküle dienen als Elektrizitätsüberträger, als Ionen; ihre Anwesenheit macht daher das Gas zu einem Leiter. Diese geladenen Moleküle kann man, wie mannigfache Versuche gezeigt haben, dem Auge direkt sichtbar machen, wenn in dem Gefäß, welches das leitende Gas enthält, etwas Wasser vorhanden ist, so daß dem Gase gesättigter Wasserdampf beigemischt ist. Sobald man nämlich nun das Gas sich etwas expandieren läßt, wobei es bekanntlich eine kleine Temperaturerniedrigung erfährt, kondensiert sich der Wasserdampf zu einem Nebel und es zeigt sich, daß die geladenen Luftpartikelchen die Kerne für die Nebentröpfchen geben. Bei sehr schwacher Temperaturerniedrigung bilden sich lauter negativ geladene Tröpfchen, es dienen also nur die negativen Ionen als Nebelkerne, bei etwas stärkerer Temperaturerniedrigung kommen dann ebenso viel positiv geladene Tröpfchen hinzu. Jedes Tröpfchen in diesem Nebel ist also gewissermaßen ein durch Belastung mit Wasser zu sichtbarer Größe angeschwollenes Ion. Diese Tatsache wurde zuerst von J. J. Thomson später von anderen Experimentatoren benutzt, um die Zahl der Moleküle in einem Gasquantum zu bestimmen (3). Wir werden die neueren Resultate weiter unten besprechen, die gefundene Zahl stimmt mit den nach anderen Methoden gut überein (Literatur 3).

Ebenso direkt hat man die molekulare Struktur der Materie an einem radioaktiven Phänomen, der sogenannten α-Strahlung der radioaktiven Körper, beobachten können. Die α-Strahlung besteht in einem Gasstrom, der nur äußerst geringe Mengen fördert, aber mit einer ganz enormen Geschwindigkeit aus dem radioaktiven Präparat herausschießt. Das ausgeschleuderte Gas, das nebenbei bemerkt bei seinem Austreten mit einer positiv elektrischen Ladung behaftet ist, hat sich durch eine Reihe von Eigenschaften als Helium erwiesen, und man kann, wenn man gewisse Messungen anstellt, berechnen, wie viel Helium in der Sekunde aus einem Radiumpräparat herausschießt. Läßt man die α-Strahlung auf ein Zinkblendepräparat aufstoßen, so bringt sie es aus einer uns noch nicht genauer bekannten Ursache zum Leuchten. Wenn man sich diese Leuchterscheinung genauer ansieht, so hat man einen höchst interessanten Anblick. Es leuchtet nicht etwa die ganze Fläche gleichmäßig, sondern es zeigen sich eine Menge Lichtpünktchen, von denen jedes kurz aufblitzt und wieder verschwindet. Man sieht hier direkt das Bombardement der Heliummoleküle, die auf den Zinkblendeschirm aufschlagen und bei jedem Schlag einen kurzen Lichtblitz erzeugen. Man braucht jetzt nur zu zählen, wieviel Lichtblitze in jeder Sekunde eintreten, um zu wissen, wieviele Heliummoleküle das Präparat pro Sekunde ausschleudert, und damit auch, aus wie vielen Molekülen eine bestimmte Menge Heliumgas gebildet wird. Eine derartige Zählung hat Regener vorgenommen. Eine ganz andere Methode, die es möglich macht, die von einem Radiumpräparat abgeschleuderten Heliummoleküle durch gewisse elektrische Wirkungen einzeln wahrzunehmen, haben Rutherford und Geiger ausgearbeitet. Ihre Zählung führte zu einem Resultat, das mit dem Regenerschen ausgezeichnet übereinstimmt (Literatur 4).

Aus all diesen Versuchsergebnissen müssen wir schließen, daß die materiellen Körper wirklich eine körnige Struktur haben, daß sie aus Molekülen aufgebaut sind. Die Moleküle werden miteinander durch anziehende Kräfte, die sogenannten Kohäsionskräfte, zu zusammenhängenden Körpern verkittet. Wenn man die Moleküle eines Körpers dadurch, daß man ihn irgendwie dehnt, etwas voneinander entfernt, so bringen die Kohäsionskräfte, die sich dann als elastische Zugkräfte äußern, sie nachher wieder zusammen. Schiebt man aber die Moleküle näher zusammen, so kehrt sich die Kraftwirkung um, es tritt ein Druck ein, eine Abstoßung, die es verhindert, daß ein Molekül

etwa in das andere eindringe. Diese Repulsionskräfte bei sehr kleinen Entfernungen, die Kräfte der Undurchdringlichkeit, und mit ihnen in Wechselwirkung die Attraktionskräfte bei größeren Entfernungen, die Kohäsionskräfte, machen es möglich, daß sich aus den Molekülen greifbare Körper von bestimmter Raumausdehnung aufbauen. Undurchdringlichkeit und Kohäsion sind die beiden Grundkräfte, durch die die Materie „den Raum erfüllt".

3. **Die Atome.** Aus den Umwandlungen der Stoffe, welche den Gegenstand der Chemie bilden, geht hervor, daß die Moleküle noch verwandelt werden können. Alle chemischen Vorgänge lassen sich aber äußerst einfach begreifen, wenn man annimmt, daß die Moleküle aus einer meistens nur kleinen Zahl nicht verwandelbarer Elementarteilchen, den Atomen, zusammengesetzt sind. Diese Annahme wird übrigens durch gewisse physikalische Tatsachen gestützt, auf die hier nicht näher eingegangen werden kann, die den Schluß sehr nahe legen, daß die Moleküle (mit wenigen Ausnahmen) noch in mehrere beweglich verbundene Teile gegliedert sind. Die chemischen Umwandlungen bestehen dann also darin, daß sich die Atome, aus denen die Moleküle bestehen, in andere Gruppierungen, zu anderen Molekülen umlagern, wobei sie selber ganz intakt und unverändert bleiben. Bei den rein physikalischen Vorgängen bleiben auch selbst die Moleküle intakt und verändern nur ihre Lage.

Nach der Atomtheorie entstehen demnach alle Veränderungen in der Welt nur dadurch, daß die unveränderlichen Atome sich bewegen, umlagern, neu gruppieren. Dabei können weder Atome verschwinden noch neu entstehen. Die Atomtheorie kann also nur dann richtig sein, wenn die Materie unvergänglich und unveränderlich ist.

In der Tat ist der Satz von der Erhaltung der Materie eines der fundamentalen Gesetze der Naturwissenschaft. Um diesem Satz einen experimentell faßbaren Sinn geben zu können, müssen wir die Möglichkeit haben, für die Menge der Materie, das heißt für die Menge der sie zusammensetzenden Atome, ein Maß anzugeben. Nun gibt es zwei Größen, die bei jedem Körper, so lange man ihn nur in sich verändert, ohne ihm etwas wegzunehmen oder hinzuzufügen, eine merkwürdige und ganz ausgezeichnete Konstanz zeigen: 1. das Gewicht, d. h. die Kraft, mit der die Erde den Körper anzieht, 2. die Trägheit, d. h. der Widerstand, den der Körper einer bestimmten Aenderung seines Bewegungszustandes entgegensetzt. Diese Größen kann man demnach beide als Maß für die Menge der Materie in einem Körper nehmen. Nun sind sie aber beide, wie die Erfahrung lehrt, einander stets genau proportional; kennt man also die eine, so ist die andere ohne weiteres zu berechnen. Man bestimmt deswegen meistens nur das Gewicht, weil dies viel leichter und viel genauer zu ermitteln ist als die Trägheit. Teilt man einen Körper in beliebig viel Stücke, so ist die Summe der Gewichte der einzelnen Stücke gleich dem Gewicht des ganzen Körpers, dasselbe gilt, wenn man mehrere Stücke zu einem einzigen Körper vereinigt. Das Gewicht ist eine additive Eigenschaft der Materie, wir können deswegen die Menge der Materie einfach dem Gewicht proportional setzen, das ist die übliche Definition der Menge. Da nun die genannten Gesetze bei jeder noch so feinen Zerteilung und bei jeder Umwandlung der Materie, auch bei chemischen Umsetzungen ihre Gültigkeit behalten, so folgt erstens, daß wir jedem Atom für sich ein Gewicht zuschreiben müssen, derart, daß das Gewicht des ganzen Körpers gleich der Summe der Gewichte seiner Atome ist, zweitens daß die Gewichte der Atome selbst unveränderlich sind, und daß demnach auch niemals ein Atom verschwinden oder entstehen kann.

Die Chemie lehrt, daß es etwa 90 verschiedene Arten von Atomen gibt, die alle verschiedene Gewichte haben. Da man durch rein chemische Untersuchungen das Verhältnis der Gewichte zweier Atome feststellen kann, so ist es möglich das Gewicht aller Atomarten relativ zu einem bestimmten Atom anzugeben. Man ist übereingekommen, die Atomgewichtszahlen auf Sauerstoff zu beziehen und das Atomgewicht des Sauerstoffs gleich 16 zu setzen. Alsdann ist nämlich das Gewicht der leichsteten Atomart, des Wasserstoffatoms, ungefähr gleich Eins (genauer 1,008).

Addiert man die Atomgewichte aller Atome, aus denen das Molekül einer bestimmten chemischen Substanz zusammengesetzt ist, so hat man damit das sogenannte Molekulargewicht der Substanz. Wenn die Zahl M das Molekulargewicht angibt, so nennen wir die Menge M Gramm 1 Grammmolekül von der betreffenden Substanz. Da das Gewicht eines Grammoleküls dem Gewicht eines einzelnen Moleküls proportional ist, so gilt der Satz: Die Zahl von Molekülen, die ein Grammmolekül bilden, ist für alle chemischen Substanzen die gleiche. Aus diesem Grunde ist es häufig vorzuziehen, die Menge einer Substanz (die Menge ihrer Moleküle) in Grammmolekülen anzugeben, und nicht in der mehr zufälligen Einheit des Gewichtes (Gramm).

4. **Die ungeordneten Bewegungen der**

Moleküle. Unser Bild von der Struktur der Materie wäre ganz unvollständig, wenn wir uns die Moleküle ruhend denken wollten. Wenn zwei verschiedene Gase oder zwei verschiedene Flüssigkeiten miteinander in Berührung sind, so beobachtet man, daß langsam Teilchen des einen Stoffes in den anderen eindringen, hineindiffundieren. Das wäre unmöglich, wenn die Moleküle in Ruhe wären. Daß man aber die Bewegung der Moleküle nicht direkt wahrnehmen kann, läßt nur eine Erklärung zu, nämlich die, daß die Moleküle regellose Zickzackbewegungen ausführen, so daß der Durchschnitt der Bewegungen aller Moleküle an einer bestimmten Stelle immer Null ist. Die Zickzackbewegung selber ist sicher außerordentlich lebhaft, und allmählich können die Moleküle dabei, wie der Diffusionsvorgang lehrt, von ihrem ursprünglichen Platz weiter und weiter wegrücken. Wenn in einer Flüssigkeit äußerst kleine Partikelchen suspendiert sind, wie in den sogenannten kolloidalen Lösungen, so kann man unter dem Mikroskop beobachten, wie diese Partikelchen an der allgemeinen Bewegung der Moleküle beteiligt sind. Sie schwärmen nämlich lebhaft umher Brownsche Bewegung), und zwar nur infolge der unregelmäßigen Stöße, die sie von den Molekülen bekommen. Dasselbe beobachtet man an feinen Rauchteilchen in Gasen.

Lange geradlinige Wegstrecken kann ein Molekül nicht zurücklegen, weil es dicht umgeben von anderen Molekülen ist, es stößt deswegen fortwährend auf andere Moleküle, prallt von ihnen ab, und beschreibt so mit rasender Geschwindigkeit komplizierte Zickzacklinien. Diese Bewegungen müssen natürlich den Verband der Moleküle lockern, der aus ihnen zusammengesetzte Körper nimmt infolgedessen stets mehr Platz ein, als er brauchen würde, wenn die Moleküle durch die Kohäsionskräfte möglichst eng aneinander gepreßt wären. Ja, die Wirkung der regellosen, heftigen Stöße kann so weit gehen, daß der Zusammenhang, den die Kohäsionskräfte herzustellen suchen, vollkommen aufgehoben wird. Dies ist der Fall in den Gasen. In einem Gase fahren die Moleküle nach jedem Zusammenstoß so heftig auseinander, daß die zwischen ihnen bestehenden Anziehungskräfte gar nicht zur Wirkung kommen können, und die Moleküle sind, abgesehen von den kurzen Momenten der Zusammenstöße so weit auseinander, daß von Kohäsion gar nichts zu merken ist. Gase sind Körper ohne jede Kohäsion. In den Flüssigkeiten wirken freilich die Kohäsionskräfte zwischen den Molekülen, sie bilden deswegen im Gegensatz zu den Gasen zusammenhängende Massen mit scharfer Oberfläche, aber immerhin treiben die fortwährenden Stöße die Moleküle so weit auseinander, daß sie zwischeneinander durchschlüpfen und große Wanderungen machen können, wie die Diffusionserscheinungen beweisen. In den festen Körpern sind die Kohäsionskräfte so stark, daß die Stöße der bewegten Moleküle wenig dagegen ausrichten können. In ihnen ist der Molekülverband nur wenig lockerer, als er es sein würde, wenn keine Bewegung vorhanden wäre. Die Moleküle können nicht mehr durcheinander schlüpfen, sie vibrieren nur um eine Gleichgewichtslage unregelmäßig hin und her. In dieser Weise gibt die Molekulartheorie Rechenschaft von den drei Aggregatzuständen, die die Materie annehmen kann.

Es ist klar, daß das Verhalten eines materiellen Körpers sich ändern muß, wenn sich die durchschnittliche Geschwindigkeit der regellosen Bewegung seiner Moleküle ändert. Mit anderen Worten: Jeder Grad dieser Bewegung stellt einen besonderen Zustand des Körpers dar, der sich in einer irgendwie wahrnehmbaren Weise äußern muß. Gewisse theoretische Ueberlegungen führen zu dem sicheren Schluß, daß der Grad der inneren Bewegung identisch ist mit dem, was man als Wärmegrad, als Temperatur, des Körpers beobachtet. Und zwar läßt sich nachweisen, daß die am Gasthermometer abgelesene sogenannte absolute Temperatur proportional ist mit dem durchschnittlichen Wert der kinetischen Energie der Zickzackbewegung eines Moleküls. Ist die Temperatur in einem Körper konstant, so hat jedes einzelne Molekül dieselbe durchschnittliche Energie seiner Zickzackbewegung (Literatur 5).

Dieser letzte Satz hat zu einer höchst interessanten Berechnung der Zahl der Moleküle geführt. Perrin verfolgte die Brownsche Bewegung kleiner in Wasser suspendierter Partikelchen messend und berechnete nach gewissen durch die Theorie gegebenen Formeln aus den sichtbaren Verschiebungen die durchschnittliche Geschwindigkeit v der unsichtbar kleinen Vibrationen der Teilchen, mit denen infolge der Stöße der Moleküle ihre Wanderung über größere Strecken verknüpft ist. Da die Teilchen groß genug waren, um durch geeignete Messungen ihre träge Masse m bestimmen zu können, ließ sich nach der Formel $\frac{m \cdot v^2}{2}$ der durchschnittliche Wert der kinetischen Energie eines Partikelchens berechnen, welcher der Temperatur des Wassers entsprach. Nach dem oben ausgesprochenen Satz ist dieser Wert identisch mit der durchschnittlichen Energie der Zickzackbewegung irgendeines Moleküls bei derselben Temperatur, da man die sus-

pendierten Teilchen als ganz grobe Moleküle auffassen kann. Andererseits ist es längst bekannt, wie man durch kalorimetrische Messungen die Energie bestimmen kann, die ein bestimmtes Quantum Materie, z. B. 1 Grammolekül bei Erwärmung um 1° C aufnimmt. Diese Energie enthält allerdings im allgemeinen außer der kinetischen Energie der Zickzackbewegung noch mehrere andere Posten, die inneren Bewegungen der Atome in den Molekülen und mehreren anderen Ursachen ihr Dasein verdanken, aber die Theorie hat längst Mittel angegeben, den wichtigsten Posten, die Energie der Zickzackbewegung, für sich experimentell zu ermitteln. Sie beträgt ungefähr 3 kleine Kalorien für 1 Grammolekül und 1° C. Man kann also die gesamte Energie der Zickzackbewegung aller Moleküle in einem Grammmolekül bei einer bestimmten absoluten Temperatur berechnen. Dividiert man diese Zahl durch den von Perrin gefundenen Wert der Energie eines einzelnen Moleküls, so bekommt man die Zahl der Moleküle v im Grammolekül. Die Messungen ergaben $v = 0{,}71 \,.\, 10^{24}$ (Literatur 6).

Da in den Gasen die komplizierten Kohäsionskräfte zwischen den Molekülen nahezu vollständig fehlen, so zeigen sie im Gegensatz zu den anderen Aggregatzuständen ein ganz gleichartiges Verhalten, unabhängig von ihrer speziellen chemischen Natur, und befolgen eine Reihe ziemlich einfacher Gesetze, die sich alle aus unseren theoretischen Vorstellungen, vom gasförmigen Aggregatzustand gut erklären lassen. Eines dieser Gesetze ist das von Avogadro, welches aussagt, daß die spezifischen Gewichte verschiedener Stoffe im gasförmigen Zustand bei gleichem Druck und gleicher Temperatur sich wie die Molekulargewichte verhalten. Daraus folgt, daß alle Gase in einem bestimmten Volumen bei einer bestimmten Temperatur und einem bestimmten Druck stets die gleiche Zahl von Molekülen haben. Man nennt diese Zahl für 1 cbm, 0°, 760 mm die Loschmidtsche Zahl. Wir haben beispielsweise oben gesehen, daß Lord Rayleigh für die Loschmidtsche Zahl den Wert N = 24,7 Trillionen gefunden habe. Aus bekannten experimentellen Daten läßt sich berechnen, daß bei 0° und 760 mm ein Grammolekül einer Substanz im gasförmigen Zustand den Raum 22 330 cbm einnimmt. Das Verhältnis der Zahl v der Moleküle im Grammolekül zur Loschmidtschen Zahl N ist also 22 330. Dividiert man die von Perrin gefundene Zahl v hierdurch, so findet man: N = 32 Trillionen. Wie vorauszusehen war, ist dieser Wert größer als der von Lord Rayleigh gefundene. Aber wahrscheinlich ist er durch nicht näher bekannte Fehlerquellen etwas zu groß geworden, und der richtige Wert von N dürfte etwa in der Mitte zwischen 32 und 24,7 liegen.

5. Die Struktur der Atome. Es wäre ein großer Irrtum, wenn man glauben wollte, die Atome wären die letzten Ur-Teilchen der Materie. Daß dies nicht der Fall sein kann, ist sehr auffällig klar geworden durch die radioaktiven Prozesse. Denn diese bestehen darin, daß richtige Atome, d. h. Partikelchen, die wir durch keine künstlichen Mittel weiter spalten können, infolge irgendwelcher sehr gewaltsamer innerer Vorgänge spontan explodieren und in Atome von kleinerem Gewicht zerfallen. Aber schon lange vor der Entdeckung dieser eigentümlichen Phänomene wußte man, daß die Atome eine höchst komplizierte innere Struktur haben müssen. Es folgt das nämlich daraus, daß die Atome imstande sind Licht auszusenden. Sie müssen also aus beweglichen Teilen bestehen, die Schwingungen machen können. Die Spektralanalyse des von den Atomen ausgesandten Lichtes zeigt, daß jedes Atom eine ganze Reihe von Schwingungen verschiedener Frequenz ausführt, die Reihen (Serien) bilden nach höchst eigentümlichen, aber theoretisch ganz unerklärlichen Gesetzen. Da das Licht in elektrischen Schwingungen besteht, so müssen die beweglichen Teile des Atoms, die die Lichtstrahlung hervorbringen, elektrische Ladungen besitzen. Ueber diese elektrischen Ladungen hat die neuere Zeit allerlei Aufschlüsse gebracht.

Schon aus den Gesetzen der Elektrolyse läßt sich schließen, daß es unmöglich ist, die Ladung eines Atoms kontinuierlich zu ändern; ein geladenes Atom oder Molekül, ein Ion, kann nur ganzzahlige Multipla einer kleinsten Elektrizitätsmenge, des sogenannten Elementarquantums der elektrischen Ladung haben. Wenn man allen Molekülen eines Grammoleküls die Ladung 1 Elementarquantums erteilt denkt, so ist die gesamte Ladung die sogenannte Aequivalentladung, die sich aus den Gesetzen der Elektrolyse zu 96 540 Coulomb berechnet. Das Elementarquantum erhält man also, wenn man diesen Wert durch die Zahl v der Moleküle im Grammolekül dividiert.

Wie oben schon erwähnt, ist es gelungen, in leitenden Gasen durch Nebelbildung die Jonen einzeln sichtbar zu machen, und an den elektrisch geladenen Tröpfchen haben zuerst H. A. Wilson, später Millikan höchst interessante Messungen vorgenommen. Millikan konnte ein einziges Tröpfchen stundenlang beobachten und dabei immer und immer wieder seine Ladung messen. Es zeigte sich, daß die Ladung sich öfters änderte, jedenfalls dadurch, daß aus dem

leitenden Gase gelegentlich Ionen zum Tröpfchen gelangten. Die Aenderung geschah aber immer in ganz regelmäßiger Weise stufenförmig, und zwar betrug die Stufe 1,63 . 10^{19} Coulomb. Das ist also das Elementarquantum der elektrischen Ladung. Dividiert man dadurch den Wert der Aequivalentladung, so erhält man die Zahl der Moleküle im Grammolekül $\nu = 0{,}59 . 10^{24}$, und die Loschmidtsche Zahl N = 26,5 Trillionen (Literatur 7).

Auch die oben erwähnte Zählung der α-Strahl-Partikelchen führt zunächst zum Elementarquantum der Ladung, da das, was man an den α-Strahlen direkt messen kann, nicht die Heliummenge, sondern die mitgeführte Ladung ist. Wie schon erwähnt führten diese Zählungen zu einem ganz ähnlichen Resultat wie die Messungen am Ionennebel.

Faßt man alle Messungen, die bisher darüber gemacht sind, zusammen, so ergeben sich für die molekularen Größen folgende Zahlen als die wahrscheinlichsten:

1. Zahl der Moleküle im Grammolekül $\nu = 0{,}62 . 10^{24}$.
2. Loschmidtsche Zahl $N = 27{,}6 . 10^{18}$.
3. Gewicht eines Wasserstoffatoms $1{,}63 . 10^{-24}$ g.
4. Elementarquantum der Ladung $1{,}56 . 10^{-19}$ Coulomb $= 4{,}69 . 10^{-10}$ e. s.

Zum Schluß sei noch ganz kurz angedeutet, wie man sich nach den neueren Forschungen ungefähr die Struktur eines Atoms zu denken hat. Es hat sich herausgestellt, daß die Atome nur dadurch eine Ladung bekommen können, daß gewisse äußerst kleine Partikelchen, deren Größe ungefähr der 1800. Teil von der des Wasserstoffatoms ist, und die stets eine negative Ladung von der Größe 1 Elementarquantum haben, die sogenannten Elektronen, aus ihnen austreten oder in sie eintreten. Im ersten Fall werden die Atome positiv, im zweiten Fall negativ geladen, und es erklärt sich hieraus, weswegen sich die Ladung nur stufenweise ändern kann. Jedes Atom, auch ein ungeladenes, besitzt an und für sich eine gewisse Anzahl von Elektronen. Wahrscheinlich hat man sich das so zu denken, daß das Atom aus einem verhältnismäßig großen positiv elektrischen Kern besteht, mit welchem seine Elektronen beweglich verbunden sind. Jedenfalls ist es festgestellt, daß die Lichtschwingungen, die das Atom aussenden kann, durch Schwingungen von Elektronen hervorgebracht werden.

Ist nun auch sichergestellt, daß die Atome eine innere Struktur haben und daß die Elektronen im Aufbau der Atome eine hervorragende Stellung einnehmen, so ist man doch noch sehr weit davon entfernt, etwas von den Kräften, die die Bestandteile der Atome miteinander verbinden, aussagen zu können. Alle Versuche, die man gemacht hat, in dieses Geheimnis einzudringen, haben so seltsame, unseren bisherigen Vorstellungen von den in der materiellen Welt wirkenden Kräften direkt widersprechende Ergebnisse zutage gefördert, daß wir bisher nur soviel sagen können, die künftige Forschung über den inneren Bau der Atome werde uns aller Voraussicht nach zugleich auch zu noch ganz neuen und ungeahnten Einblicken in das eigentliche Wesen der Materie selbst führen.

Literatur. *1.* ***A. Oberbeck****, Wied. Ann.* ***31****, S. 331, 1887. —* ***Derselbe****, Wied. Ann.* ***49****, S. 366, 1893. —* ***W. C. Röntgen****, Wied. Ann.* ***41****, S. 321, 1890. — Ferner beschäftigen sich mit demselben Thema noch folgende Autoren:* ***L. Sohncke****, Wied. Ann.* ***40****, S. 345, 1890. —* ***Lord Rayleigh****, Proc. Roy. Soc.* ***48****, S. 128, 1890. — 2.* ***Lord Rayleigh****, Phil. Mag. (5)* ***47****, S. 374, 1891. — Vgl. hierzu auch:* ***Lord Kelvin****, Baltimore Lectures. London 1904. — 3.* ***J. J. Thomson****, Phil. Mag. (6)* ***5****, S. 346, 1903. — 4.* ***E. Regener****, Ber. d. Akad. d. W., S. 948. Berlin 1909. —* ***E. Rutherford und H. Geiger****, Jahrb. f. Radioaktivität und Elektronik* ***5****, S. 408, 1908. — 5.* ***O. E. Meyer****, Kinetische Theorie der Gase. Breslau 1877. —* ***L. Boltzmann****, Gastheorie. Leipzig 1896 und 1898. —* ***J. W. Gibbs****, Statistische Mechanik (übers. v. E. Zermelo). Leipzig 1905. — 6.* ***J. Perrin****, Ann. de Chimie et de Physique (8)* ***18****, S. 1, 1909. Phys. Zeitschr.* ***11****, S. 461, 1910. —* ***A. Einstein****, Ann. d. Phys. (4)* ***19****, S. 371, 1906. — 7.* ***H. A. Wilson****, Phil. Mag. (6)* ***5****, S. 429, 1903. —* ***R. A. Millikan und H. Fletcher****, Phys. Zeitschr.* ***11****, 1097, 1910 und* ***12****, S. 161, 1911. — Ferner beschäftigen sich mit demselben Thema folgende Autoren:* ***F. Ehrenhaft****, Phys. Zeitschr.* ***11****, S. 940, 1910 und* ***12****, S. 94 und 261, 1911. —* ***K. Przibram****, Phys. Zeitschr.* ***12****, S. 62 und 260, 1911;* ***13****, S. 106, 1912. —* ***E. Weiss****, Phys. Zeitschr.* ***12****, S. 630, 1911. —* ***E. Regener****, Phys. Zeitschr.* ***12****, S. 135, 1911.*

Eine sehr genaue Berechnung der Zahl der Moleküle hat M. Planck aus den Gesetzen der Strahlung eines schwarzen Körpers machen können: ***M. Planck****, Ann. d. Phys. (4)* ***4****, S. 564, 1901.*

Zusammenfassende Darstellungen des Gegenstandes findet man in folgenden Werken: ***Lord Kelvin****, Baltimore Lectures on Molecular Dynamics and the Wave Theory of Light. London 1904. —* ***Gustav Mie****, Moleküle, Atome, Weltäther 3. Aufl. Leipzig 1911.*

G. Mie.

Maupertuis

Pierre Louis Moreau de.

Geboren am 28. September 1698 in St. Malo; gestorben am 27. Juli 1759 in Basel. Er trat 1718 in die Armee ein, nahm als Dragonerkapitän seinen Abschied, ging 1728 nach England, dann nach Basel, um bei Johann Bernoulli

Integralrechnung zu hören. 1736 leitete er die Gradmessung in Lappland und fand durch seine Beobachtungen die Theorie von der Abplattung der Erde bestätigt. 1740 berief Friedrich der Große ihn nach Berlin zum Präsidenten der Akademie. 1744 veröffentlichte Maupertuis das Prinzip der kleinsten Wirkung, mit dessen Formulierung er sich seit 1740 trug. Durch sein Bestreben mit Hilfe dieses Prinzips das Dasein Gottes mathematisch zu beweisen, geriet er in Streit mit Voltaire; Friedrich der Große nahm Partei für Maupertuis und ließ Voltaires boshafte Anklageschrift öffentlich verbrennen; Maupertuis hatte aber seine Gesundheit in diesen Streitigkeiten aufgerieben und starb auf der Rückkehr von einer Erholungsreise nach dem Süden in Basel.

Literatur. ***E. du Bois-Reymond,*** *M., Rede, Leipzig 1893.* — ***R. Wolf,*** *Biographien zur Kulturgeschichte der Schweiz II, Zürich 1859.*

E. Drude.

Maximowicz
K. J.

Botaniker. Geboren am 23. November 1827 zu Tula in Rußland, studierte von 1845 ab in Dorpat Medizin, später Botanik unter Bunge und wurde 1852 Konservator am Botanischen Garten in St. Petersburg. Im folgenden Jahre nahm er an der Weltumsegelung der Fregatte „Diana“ teil, die, über Südamerika und den Stillen Ozean gehend, in Ostasien ein vorzeitiges Ende fand. Hierdurch wurde Maximowicz veranlaßt, sich eingehend mit der dortigen Flora, speziell des Amurgebietes zu beschäftigen. 1857 nach Petersburg zurückgekehrt, bearbeitete er seine Reiseausbeute, und veröffentlichte 1859 in den Memoiren der dortigen Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften seine Primitiae Florae Amurensis, wofür er im gleichen Jahre zum außerordentlichen Mitglied dieser Akademie gewählt wurde. Gleich darauf trat er eine neue Reise in das Amurgebiet an, die bis Japan ausgedehnt wurde, und von der er 1864 zurückkehrte. 1869 wurde er zum Oberbotaniker des Petersburger Botanischen Gartens, 1871 zum ordentlichen Akademiemitgliede ernannt. Neben seiner eigenen Reiseausbeute bearbeitete er später zahlreiche andere aus dem Amurgebiet und Japan stammende Sammlungen, namentlich aber auch solche aus China, der südlichen Mongolei, Osttibet usw. Er starb am 16. Februar 1891. Seine vielfach nicht vollendeten Arbeiten sind durch den diagnostischen Scharfblick und die Sorgfalt, die sie bekunden, und das weite Florengebiet, über das sie zum erstenmal eingehenderen Aufschluß gaben, bemerkenswert. Sie erschienen vielfach in den Sitzungsberichten und Denkschriften der Petersburger Akademie, den Arbeiten des dortigen Botanischen Gartens und dem Bull. de la Soc. imp. des natur. d. Moscou.

Literatur. ***P. Ascherson*** *in Ber. d. Deutsch. Botan. Gesellsch. Bd. IX, 1891, S. (11).*

W. Ruhland.

Maxwell
James Clerk.

Geboren am 13. November 1831 in Edinburg; gestorben am 5. November 1879 in Cambridge. Er wurde in Edinburg erzogen, wo er 1840—1847 die Akademie, 1847—1850 die Universität besuchte. Von 1856—1860 hatte er den Lehrstuhl für Naturphilosophie in Aberdeen inne, 1860 wurde er zum Professor der Physik und Astronomie am Kings College in London ernannt, legte 1868 diese Stellung nieder, um sich auf seine Besitzung Glenlair in Schottland zurückzuziehen. 1871 wurde er zum ersten Inhaber des neugegründeten Lehrstuhls für Physik in Cambridge ernannt. Jeden Schritt des Neubaus des Laboratoriums und der Zusammenstellung der Apparatensammlung überwachte er aufs Sorgfältigste. Schon im Alter von 15 Jahren schloß Maxwell seine erste wissenschaftliche Arbeit ab, die durch Forbes der Royal Society überreicht wurde. Eine Abhandlung über Faradays Kraftlinien trug ihm 1859 den Adamspreis ein. Sein grundlegendes Werk Electricity and Magnetism erschien 1873, nachdem er schon 1867 der Royal Society die erste Mitteilung hatte zugehen lassen. Maxwell hat Faradays Ideen über die elektrischen und magnetischen Kräfte in mathematische Form gebracht und die nach ihm benannten Grundgleichungen der Elektrodynamik aufgestellt. Die Krönung seiner Arbeit bildet die Formulierung der elektromagnetischen Lichttheorie, durch die er eine neue Epoche der Physik eingeleitet hat. Auch auf dem Gebiet der kinetischen Gastheorie und Wärmetheorie hat er grundlegend gearbeitet. Er war ein Mensch von liebenswürdigen Eigenschaften und überzeugter Christ.

Literatur. *Nature XXI, 6, 27. Nov. 1879,* ***W. Garnett,*** *James Clerk Maxwell, S. 43 bis 46.* — ***Campbell and Garnett,*** *Life, correspondence and occasional writing of J. C. Maxwell, 2. Aufl., London 1884.*

E. Drude.

Mayer
Julius Robert.

1814 bis 1878, der Entdecker des Gesetzes von der Erhaltung der Kraft. Er wurde in Heilbronn geboren, studierte in Tübingen und München, promovierte hier 1838, praktizierte in Heilbronn, war seit 1839 Schiffsarzt und wurde während seiner Reise nach Java auf einem holländischen Schiff durch die Beobachtung des hellroten Venenblutes nach Aderlässen auf den Gedanken gebracht, daß diese Erscheinung mit der veränderten Wärmeökonomie des Körpers zusammenhänge. Nachdem Mayer dann 1841 von der Reise zurückgekehrt war, beschäftigte er sich mit dieser Beobachtung in seinen Mußestunden und veröffentlichte die Ergebnisse dieser Forschungen in Wöhlers und Liebigs Annalen der Chemie 1842, sowie in verschiedenen selbständig erschienenen Schriften (Heilbronn 1845 bis 1851). Mayer betont in allen diesen Schriften, von denen er einige auf eigene Kosten drucken lassen mußte, da er mit seinen Ansichten nicht zur Geltung kommen konnte, andererseits ihm

sogar die Priorität (von Helmholtz: Joule) streitig gemacht wurde, das Gesetz der Unzerstörbarkeit der Kraft. Mit voller Klarheit findet sich bei ihm zum ersten Male der Begriff der Aequivalenz von Arbeit und Wärme ausgesprochen, mit großem Scharfsinn auch auf die Astronomie und menschliche Physiologie übertragen. Er fand als Stadt- und Oberamtswundarzt in seiner Vaterstadt Anstellung, mußte jedoch von 1852 bis 1854 im Irrenhause zu Göppingen zubringen, von wo er geheilt entlassen wurde, um dann die Genugtuung zu erleben, daß alle seine Arbeiten volle Anerkennung fanden und dem Autor auch verschiedene äußere Ehrungen von Akademien und Universitäten, auch den persönlichen Adel, verschafften. 1869 hielt Mayer auf Einladung während der Innsbrucker Naturforscher-Versammlung seinen bekannten Vortrag über die notwendigen Konsequenzen und Inkonsequenzen der Wärmemechanik. Dieser Vortrag erschien später zusammen mit einigen anderen unter dem Titel Naturwissenschaftliche Vorträge (Stuttgart 1872).

Literatur. *Pagel*, Biogr. Lex.

J. Pagel.

Mechanochemie.

1. Begriff und Umfang. 2. Mechanochemie im engeren Sinn: a) Volumänderung durch Druck und Zug. b) Einfluß des Drucks auf die Eigenschaften chemisch reiner Stoffe. c) Einfluß des Drucks auf Phasengleichgewichte. d) Einfluß des Drucks auf nicht disperse chemische Systeme mit mehreren Komponenten. e) Einfluß des Drucks auf disperse Systeme. 3. Binnendrucktheorie der Lösungen. 4. Kapillarchemie: a) Die Grenzfläche ist flüssig-gasförmig. b) Die Grenzfläche ist flüssig-flüssig. c) Die Grenzfläche ist fest-gasförmig und fest-flüssig. d) Kapillarelektrische Erscheinungen. e) Die Kolloidchemie als angewandte Kapillarchemie. 5. Der Einfluß von Schwerkraft und Zentrifugalkraft auf chemische Systeme.

1. Begriff und Umfang. Der Begriff Mechanochemie ist bisher nur wenig gebräuchlich gewesen. Es ist aber zweckmäßig, ihn zu prägen, um den Einfluß mechanischer Kräfte (Druck bezw. Schwerkraft, Zentrifugalkraft usw.) auf chemische Systeme zusammenfassend darzustellen. Im folgenden soll zunächst der Einfluß des Drucks im weitesten Sinn besprochen werden; eingeschlossen sind hierbei unter anderem auch die Erscheinungen, die der sogenannte Binnendruck der Flüssigkeiten und die damit verknüpfte Oberflächenspannung hervorruft, d. h. also ein großer Teil der sogenannten Kapillarchemie; den Abschluß bildet der Einfluß der Schwerkraft und Zentrifugalkraft.

2. Mechanochemie im engeren Sinn. 2a) Volumänderung durch Druck und Zug. Die augenscheinlichste Veränderung, die eine Druckänderung hervorruft, ist die mit ihr verknüpfte Aenderung des Volums. Bringt man eine gegebene Menge einer Phase, die unter gewöhnlichen Bedingungen unter Atmosphärendruck steht, in einen Raum, der auf der einen Seite durch einen verschiebbaren Stempel abgeschlossen ist, und erhöht man den auf dem Stempel ruhenden Druck, so beobachtet man im allgemeinen eine Verkleinerung des Volums der betreffenden Phasenmenge. Sie ist also kompressibel.

Am einfachsten liegen die Verhältnisse bei den idealen Gasen (vgl. den Artikel „Gase“). Die Beziehung zwischen Druck p und Volum v ist bekanntlich eindeutig durch die Gasgleichung von Boyle und Gay Lussac $pv = RT$ gegeben, wo T die absolute Temperatur ist und R eine Konstante, die für alle Gase den gleichen Wert hat, wenn man Volume vergleicht, die nicht gleich viel Gramm des Gases, sondern gleich viel Mol (= Molekulargewicht) enthalten. Der Wert von R ist 0,08207, wenn man p in Atmosphären, v in Litern ausdrückt, oder 1,985 Grammkalorien.

Das Verhalten der idealen Gase ist so einfach, daß man hier wenig von der Größe Gebrauch macht, die man sonst zur Darstellung der Kompressibilität benutzt. Es ist dies der Kompressibilitätskoeffizient $\beta = -\frac{1}{v}\frac{dv}{dp}$, d. h. die relative Abnahme des Volums mit dem Druck. Berechnet man den Wert für $\frac{dv}{dp}$ aus der Gasgleichung, so ergibt sich $\beta = \frac{1}{p}$, gleich dem reziproken Wert des Druckes. Das Reziproke des Kompressibilitätskoeffizienten wird als Elastizitätskoeffizient bezeichnet.

Wie es beim idealen Verhalten eines Gases selbstverständlich ist, macht es nichts aus, ob man es mit einem chemisch einheitlichen Gas oder einem Gasgemisch zu tun hat.

Dem Gesetz von Boyle und Gay Lussac gehorchen die Gase nur bei kleinen Drucken. Bei höheren Drucken treten allgemein Abweichungen auf und zwar ist bei weitaus den meisten Gasen zunächst das Volum kleiner als es der Gasgleichung entspricht; bei noch größeren Drucken aber wieder größer; mit anderen Worten: der Kompressibilitätskoeffizient nimmt beim Ansteigen des Druckes erst zu und dann ab. Eine Ausnahme bildet unter anderen der Wasserstoff, der mit wachsendem Druck nur eine Verkleinerung der Kompressibilität zeigt.

Man braucht also verwickeltere Gleichungen, um das Verhalten eines Gases auch bei höheren Drucken darzustellen. Von den vielen Formeln, die vorgeschlagen worden sind, sei nur die erörtert, die verhältnismäßig am einfachsten ist und mit dem entschie-

densten Erfolg verwandt wurde. Es ist dies die berühmte Formel von van der Waals

$$\left(p + \frac{a}{v_2}\right)(v - b) = RT.$$

Um sie zu verstehen, muß man kurz die sogenannte kinetische Theorie der Gase besprechen (vgl. den Artikel „Kinetische Theorie der Materie"; ferner „Kritische Erscheinungen" im Artikel „Aggregatzustände"). Es hat sich gezeigt, daß man zu der Gleichung von Boyle und Gay Lussac gelangt, wenn man annimmt, daß ein Gas aus kleinsten, elastischen Teilchen besteht, die in lebhafter, geradliniger, regelloser Bewegung sich befinden und sich nicht anziehen: der Stoß dieser Teilchen auf die Wände eines umgebenden Gefäßes erzeugt den Druck. Erfahrungen bei der Elektrizitätsleitung in Gasen, bei der Radioaktivität u. a. m. haben dahin geführt, daß die Grundlagen dieser Annahmen nicht als bloße Hypothesen, sondern als überaus wahrscheinliche Theorie angesehen werden müssen.

Nicht zutreffend ist nun die Annahme, daß die Gasteilchen keine Anziehung aufeinander ausüben; diese läßt sich vielmehr durch Experimente sehr wahrscheinlich machen. van der Waals nennt die spezifische Anziehung der Teilchen aufeinander a und nimmt an, daß sie dem Quadrat der Dichte proportional, oder dem des spezifischen Volums umgekehrt proportional ist. Der wahre Druck ist demgemäß um $\frac{a}{v^2}$ größer als der manometrisch gemessene p.

Außerdem ist aber nun zu berücksichtigen, daß das Volum v nicht unbegrenzt veränderlich ist. Die Gasteilchen selbst werden als inkompressibel angenommen; ist also das Volum so klein, daß kein Zwischenraum zwischen den Teilchen mehr besteht, sie sich berühren, so ist dies Volum nicht mehr variabel. Man muß also das inkompressible Volum b von v abziehen. Auf Grund gewisser hypothetischer Annahmen gelangt van der Waals zu der Anschauung, daß dies inkompressible Volum gleich dem Vierfachen des wahren Volums der Moleküle ist.

Daß diese Einführungen dem Verhalten der p-v-Kurve der Gase bei höheren Drucken qualitativ gerecht werden, ist leicht einzusehen: bei kleinem p und großem v kann man $\frac{a}{v^2}$ und b neben p und v vernachlässigen, d. h. man hat das Boyle-Gay Lussacsche Gesetz; bei größerem Druck und kleinerem v kommt zunächst $\frac{a}{v^2}$ neben p in Frage, d. h. durch die Anziehung wird das Volum stärker verkleinert, als es das eben genannte Gesetz erwarten läßt; bei noch größerem Druck und noch kleinerem v überwiegt mehr und mehr der Einfluß des b, d. h. das Gas läßt sich wegen des inkompressiblen Volums nicht so stark zusammendrücken als ursprünglich angenommen wurde.

Es lassen sich Werte für a und b finden, die quantitativ das Verhalten der Gase bis zu hohen Drucken darstellen.

Aus dem Wert von b läßt sich unter gewissen Voraussetzungen die absolute Größe der Gasmoleküle ableiten, die mit der auf anderem Wege gefundenen übereinstimmt.

Uebrigens ist es bei höheren Drucken nicht gleichgültig, ob man ein chemisch einheitliches Gas oder ein Gasgemisch vor sich hat, da die Größen a und b spezifisch sind und dann noch weiter die Anziehung der Gasteilchen verschiedener chemischer Art zu berücksichtigen ist. Viel ist über das Verhalten derartiger Gasgemische nicht bekannt.

Messungen dieser Art sind grundsätzlich nicht schwierig: man mißt das Volum des Gases bei verschiedenen Drucken; Schwierigkeiten bietet nur die Herstellung der hohen Drucke, die bald mit Hilfe von Quecksilbersäulen, bald mittels Pumpen erzeugt wurden, und die Bestimmung des Volums bei undurchsichtigem Wandmaterial.

Flüssigkeiten (vgl. auch den Artikel „Flüssigkeiten") unterscheiden sich dadurch wesentlich von Gasen, daß sie viel weniger kompressibel sind. Es gehören sehr große Drucke dazu, um eine Volumänderung bemerkbar zu machen. So ist z. B. der Kompressibilitätskoeffizient des Wassers bei 25° etwa 48.10^{-6}, d. h. bei einer Druckerhöhung von einer Atmosphäre verringert sich das Volum eines Liters Wassers nur um 48 cmm.

Die Bestimmung ist daher schwierig. Man muß hohe Drucke anwenden und das Volum meist bei undurchsichtigem Wandmaterial feststellen. Richards hat neuerdings mit Erfolg den Kunstgriff angewandt, daß er das Volum der zu untersuchenden Flüssigkeit mit einem Quecksilberfaden abschließen ließ und dann durch Unterbrechen eines elektrischen Kontakts die Größe des Volums erkennen konnte. Erst in der letzten Zeit weiß man daher etwas mehr über die Zusammendrückbarkeit von Flüssigkeiten.

Sie ist nicht konstant, sondern nimmt mit steigendem Druck ab. Man muß also beim Vergleich von Kompressibilitäten auch den angewandten Druck mit angeben. Fehlt eine besondere Angabe, so handelt es sich meist um den Kompressibilitätskoeffizienten bei 1 oder 0 Atmosphäre Druck.

Die Gleichung von van der Waals stellt nun nicht bloß den Zusammenhang von Druck und Volum bei Gasen dar, sondern auch bei Flüssigkeiten. Es hat hiermit folgende Bewandtnis: erwärmt

man ein System Flüssigkeit — gesättigter Dampf auf die sogenannte kritische Temperatur (vgl. „Kritische Erscheinungen" im Artikel „Aggregatzustände"), so verschwindet der Meniskus, Gas und Flüssigkeit werden identisch; man kann bei geeigneten Druck- und Temperaturbedingungen stetig, ohne Trennung in die Phasen, vom flüssigen in den gasförmigen Zustand übergehen. Daraus folgt, daß, wenn man das Verhalten der komprimierten Gase durch Anwendung der Konstanten a und b wiedergeben kann, es auch für die Flüssigkeiten möglich sein sollte. Trägt man die Werte von p und v, wie sie sich aus der van der Waalsschen Gleichung für eine Temperatur unter der kritischen ergeben, als Kurve auf, so erhält man Figur 1; hier stellt das Stück $\alpha\beta$ das Verhalten eines komprimierten Gases dar. Das Stück $\beta\gamma\delta\varepsilon$ ist nicht realisierbar;

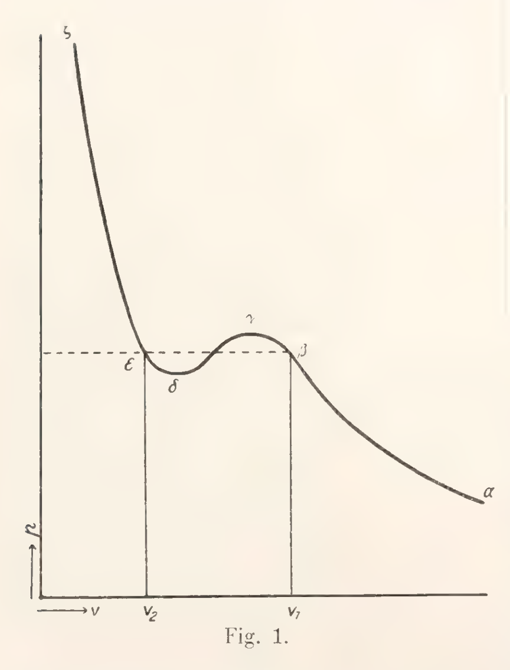


Fig. 1.

hier hat man zwei Phasen, Flüssigkeit und Dampf, bei dem für die Temperatur charakteristischen Dampfdruck, wie ihn die gestrichelte Grade andeutet, und die spezifischen Volume v_1 für den Dampf, v_2 für die Flüssigkeit. Das Stück $\varepsilon\zeta$ stellt das Verhalten der Flüssigkeit dar. Man kann aus diesem Stück mit Erfolg die Kompressibilität einer Flüssigkeit, z. B. eines verflüssigten Gases, ihre Abhängigkeit vom Druck usw. ableiten; für die gewöhnlichen Flüssigkeiten sind die Werte a und b meist nicht sicher genug bekannt.

Der Ausdruck $\frac{a}{v^2}$ in der van der Waalsschen Gleichung nimmt bei Flüssigkeiten sehr beträchtliche Werte an, denn das spezifische Volum der Flüssigkeiten ist verglichen mit dem der Gase klein; es kommt also die Molekularanziehung stark in Betracht, eben weil die Moleküle dicht aneinander gedrängt sind. Man nennt $K = \frac{a}{v^2}$ den Binnendruck der Flüssigkeit; er ist für die Theorie derselben von großer Bedeutung, obwohl er nicht unmittelbar meßbar ist (siehe weiter unten).

Die Kompressibilität hängt auch mit einer Reihe anderer Eigenschaften zusammen. So ist im allgemeinen der Kompressibilitätskoeffizient um so größer, je kleiner die Oberflächenspannung (vgl. den Artikel „Flüssigkeiten") ist; dies läßt sich auch aus ihrem Zusammenhang mit dem Binnendruck (siehe später) folgern. Ferner ist die Löslichkeit schwerlöslicher Stoffe z. B. der einfachen Gase in Flüssigkeiten fast durchweg um so größer, je größer der Kompressibilitätskoeffizient der Lösungsmittel ist.

Dies gilt nicht nur für chemisch einheitliche Flüssigkeiten, sondern auch für Lösungen. So erniedrigen z. B. die anorganischen Neutralsalze den Kompressibilitätskoeffizienten des Wassers, erhöhen die Oberflächenspannung und erniedrigen die Löslichkeit schwerlöslicher Stoffe in allen Fällen in einer charakteristischen Reihenfolge. Aehnliches gilt für Gemische organischer Flüssigkeiten.

Mit steigender Temperatur nimmt der Kompressibilitätskoeffizient im allgemeinen ab. Eine Ausnahme bildet das Wasser, dessen Kompressibilitätskoeffizient bei etwa 60° einen kleinsten Wert hat. Uebrigens zeigt auch die Löslichkeit einer Reihe schwerlöslicher Gase in dieser Temperaturgegend ein Minimum.

Man kann nun durch geeignete Versuchsanordnungen, auf die einzugehen hier zu weit führen würde, die Flüssigkeiten einem negativen Druck, einem Zug aussetzen. Quantitative Versuche lassen sich ziemlich schwer anstellen; erst ganz neuerdings sind sie J. Meyer in weiterem Umfange gelungen. Aus diesen geht nun hervor, daß die Volum-Druck-Kurve ganz stetig von positiven zu negativen Druckwerten übergeht, daß man also ohne weiteres aus den Werten des Kompressibilitätskoeffizienten für positive Drucke auch die für negative Werte extrapolieren kann.

Eine weitere Frage ist, wieweit man Flüssigkeiten einem scherenden Zug, einer Torsion aussetzen kann, bis zu welchem Grad sie eine Verschiebungselastizität haben, ob also ein verschobenes Flüssigkeitsteilchen in seine ursprüngliche Lage

zurückzukehren bestrebt ist und welchen Wert die Relaxationszeit hat, d. h. die Zeit, die hierzu erforderlich ist. Kundt stellte schon Versuche derart an, daß er einen kleinen Vollzylinder in einem nur wenig größeren, konzentrischen, mit Flüssigkeit gefüllten Hohlzylinder rotieren ließ und prüfte, ob ein durch die Flüssigkeit gesandter Lichtstrahl doppelt gebrochen wurde, und Versuche mit ähnlichem Ziel wurden von verschiedenen anderen Autoren, vor allem von Tammann, mit anderen Methoden angestellt. Sie scheinen alle zu ergeben, daß homogene Flüssigkeiten, selbst zähe wie Glyzerin, nur einem sehr kleinen scherenden Zug ausgesetzt werden können, daß die Relaxationszeit sehr kurz ist. Dagegen kann man manche Kolloidlösungen, z. B. Lösungen von Gelatine, deutlich in der beschriebenen Weise doppeltbrechend machen, also tordieren und die Relaxationszeit wird meßbar. Es sind die suspendierten, zähen, halbfesten Teilchen, die wahrscheinlich diese Erscheinung verursachen.

Noch mannigfaltiger sind die Verhältnisse bei den festen Körpern (vgl. auch den Artikel „Feste Körper"). Zunächst hat man auch hier die Kompressibilität, die Volumänderung bei allseitigem Druck. Diese läßt sich z. B. in demselben Apparat w e die Zusammendrückbarkeit der Flüssigkeiten messen, indem man den festen Stoff in einer ihn nicht angreifenden Flüssigkeit von bekannter Kompressibilität zusammendrückt. Das Versuchsmaterial ist noch nicht sehr umfangreich und zuverlässig. Die Kompressibilitätskoeffizienten sind meist 10 bis 50 mal kleiner als die für Flüssigkeiten bei derselben Temperatur, gehen aber auch bis zu deren Werten hinauf. Nach den Versuchen von Richards ist z. B. der Kompressibilitätskoeffizient bei 20° in einem Druckbereich von 100 bis 500 Atmosphären für Silizium $0{,}16 . 10^{-6}$, für NaCl $4{,}1 . 10^{-6}$, für metallisches Na $15 . 10^{-6}$. Seine Versuche ergeben ferner, daß bei den Halogenmetallsalzen die Elemente viel zusammendrückbarer sind, als die Verbindungen, demgemäß besteht auch eine ähnliche Beziehung zwischen Kompressibilität und Oberflächenspannung wie bei den Flüssigkeiten. Der Kompressibilitätskoeffizient nimmt allgemein mit steigender Temperatur merklich zu. Tammann fand, daß ein Stoff in amorph-fester Form beträchtlich zusammendrückbarer ist als in kristallinischer.

Charakteristisch für den festen Zustand ist nun bekanntlich, daß nicht nur eine Volumelastizität, sondern auch eine Formelastizität vorhanden ist, d. h. der feste Körper hat ein gewisses Bestreben seine Form beizubehalten, seine Teilchen lassen sich mehr oder minder schwer gegeneinander verschieben und zeigen eine bestimmte Neigung in ihre ursprüngliche Lage zurückzukehren.

Dies bedingt eine Reihe wichtiger Eigenschaften, die in ihrer Gesamtheit den festen Zustand definieren. Dies Gebiet ist bisher nur nach der physikalischen Seite weit ausgebaut worden, man kennt eine große Zahl physikalischer Anordnungen, die die charakteristischen Größen zu messen erlauben; man weiß aber nur wenig darüber, wie diese Eigenschaften untereinander und mit der stofflichen Natur des Körpers zusammenhängen.

Wenn man auf einen festen Körper in einer bestimmten Richtung eine nicht zu starke Kraft wirken läßt und dadurch eine nicht zu große Formveränderung erzeugt, so kann, sobald die äußere Kraft zu wirken aufgehört hat, die ursprüngliche Form völlig wieder eingenommen werden. Hierin äußern sich die elastischen Eigenschaften der festen Körper. Die Elastizität der Dehnung mißt man z. B., wenn man einen gestreckten, festen Zylinder dehnt; das Verhältnis von wirkender Kraft zur Deformation ergibt den Elastizitätskoeffizienten der Dehnung. Bei der Dehnung tritt eine Aenderung des Querschnitts ein; das Verhältnis von relativer Dehnung zur relativen Verkürzung des Durchmessers des Querschnitts wird als Poissonsche Konstante bezeichnet. Sie verknüpft, wie theoretische Ueberlegungen zeigen, die Elastizität der Dehnung mit der Kompressibilität.

Daneben hat man den Elastizitätskoeffizienten der Torsion zu berücksichtigen, der bei einer Drehung um eine Achse oder einer Scherung in Betracht kommt.

Sehr verwickelt werden die Verhältnisse bei Kristallen, da hier die Richtungen noch von Einfluß sind. Um nur ein Beispiel anzuführen, sind 21 Konstanten nötig, um einen triklinen Kristall völlig zu charakterisieren. Die theoretische und experimentelle Untersuchung dieser komplizierten Erscheinungen ist von Voigt sehr gefördert worden.

Außer diesen Größen, die Gleichgewichtszustände kennzeichnen, kommen nun noch zeitliche Faktoren in Frage. Der deformierte Körper braucht Zeit, um in seine ursprüngliche Form zurückzukehren. Es ist dies die elastische Nachwirkung. Der zeitliche Verlauf dieses Vorgangs läßt sich nicht in ganz einfacher Weise beschreiben; es macht z. B. etwas aus, ob die Deformation lange oder kurz gewirkt hat usw.

Läßt man erhebliche Kräfte auf den festen Körper wirken, so überschreitet man die sogenannte Elastizitätsgrenze und erzielt Deformationen, die nicht mehr rückgängig gemacht werden können. Diese sind

von der elastischen Nachwirkung wohl zu unterscheiden.

Charakteristisch ist dann vor allem der Fall, daß bei einer großen Kraft der Verband der Teilchen, die den festen Körper ausmachen, aufgehoben wird. Man hat es dann mit der Festigkeit des Körpers zu tun und unterscheidet da vor allem Zug-, Druck- und Torsionsfestigkeit. Hieran schließt sich weiter die Härte; diese ist dadurch gekennzeichnet, daß man Kräfte bestimmt, die imstande sind, wenige Teilchen aus dem Verband des festen Körpers zu entfernen. Dies gilt für die Definition der Härte, wie sie in der Mineralogie benutzt wird; hier bestimmt man mit dem Sklerometer die Breite der bei gegebener Belastung von einer kegelförmigen Spitze erzeugten Ritzen. Hertz hat die Härte anders definiert, nämlich als den Druck, der beim Aufdrücken einer Kugel auf eine Ebene im Zentrum der Druckfläche herrschen muß, damit dort die Elastizitätsgrenze erreicht wird. Nach dieser Definition hat man nur bei spröden Körpern ein Abtrennen von Teilchen zu erwarten, bei elastischen tritt nur eine dauernde Deformation ein. Die Härte ist danach besser als Eindringungsfestigkeit zu bezeichnen.

Die physikalisch-chemische Seite dieser Erscheinungen ist noch sehr wenig bekannt. Es liegt dies vor allem daran, daß es schwer hält, eindeutige Werte für diese Eigenschaften zu erhalten; bei den Metallen, die der Untersuchung besonders gut zugänglich sind, bedingt meist jede Bearbeitung, jede Verschiedenheit in der Vorbehandlung große Aenderungen in den betreffenden Werten. Und zwar ist diese Veränderlichkeit nicht etwa nur dadurch verursacht, daß man es bei den Metallen gewöhnlich mit Lösungen zu tun hat, die sich sogar oft in einem labilen oder metastabilen Zustand befinden; auch bei reinen Metallen ist sie vorhanden. Erst in der letzten Zeit hat sich manches aufgeklärt, vor allem durch die Untersuchungen Tammanns.

Es hat sich nämlich gezeigt, daß die mechanischen Eigenschaften des festen Metallstückes nicht etwa eindeutig durch die Eigenschaften seiner Kristalleinheiten — der Kristallite — bedingt sind, sondern vor allem auch durch die Zahl und Anordnung dieser Kristallite. Eine Vermehrung der Zahl der Kristallite macht im allgemeinen ein reines Metall härter und erhöht die Elastizitätsgrenze. So kommt es, daß, wenn man ein geschmolzenes Metall abschreckt und so die Zahl der Kristallkeime und dadurch der Kristalliten sehr vermehrt, auch die Elastizitätsgrenze und Härte dadurch erhöht wird. Ebenso erzeugt einseitiger Druck über die Elastizitätsgrenze hinaus — nicht aber allseitige Kompression — eine größere Zahl von verkleinerten Kristalliten und verursacht so eine größere Härte und Steigerung der Elastizitätsgrenze. Alles Härten eines Metalls durch Pressen, Schmieden, Walzen usw. beruht auf diesem Einfluß. Allerdings ist noch Voraussetzung, daß die Kristallite, wenn verkleinert, sich nicht bei der stärkeren Beanspruchung voneinander trennen. Es müssen viele, möglichst verschieden gerichtete Gleitflächen vorhanden sein, sonst kann auch leicht ein Brechen der Kristallite erfolgen.

In Uebereinstimmung mit diesem allem steht die weitere Erfahrung, daß Legierungen in ihrem eutektischen Punkt besonders hart sind und eine hohe Elastizitätsgrenze haben; eutektische Legierungen zeichnen sich meist durch ein besonders feines Gefüge aus.

Dies alles soll nur andeuten, wie außer den spezifischen Eigenschaften der Kristallite noch andere Faktoren die mechanischen Eigenschaften beeinflussen. Uebrigens fehlt es noch sehr an Untersuchungen, bei denen möglichst verschiedene mechanische Eigenschaften an dem gleichen Material verglichen wurden.

2b) Einfluß des Drucks auf die Eigenschaften chemisch reiner Stoffe. Es wäre nun weiter der Einfluß des Drucks auf andere Eigenschaften chemisch reiner Stoffe zu erörtern. Vorher mag aber auf den Satz aufmerksam gemacht werden, der die Verschiebung eines chemischen Gleichgewichtszustandes durch Druck regelt. Aus dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre folgt, daß, wenn man ein chemisches System bei konstanter Temperatur allseitig zusammendrückt, eine Verschiebung des Gleichgewichts nach der Seite hin erfolgt, die mit einer Volumverminderung verknüpft ist. Es ist dies das Prinzip von Braun und Le Chatelier.

Fast erscheint es als selbstverständlich, daß die Dichte eines Stoffes unter dem Einfluß allseitigen Drucks zunimmt, da ja das Volum abnimmt. Es bestehen nun Fälle, die hiermit und deshalb auch mit dem eben erwähnten allgemeinen Gesetz in Widerspruch zu stehen scheinen. Kahlbaum und Spring fanden, daß, wenn man verschiedene Stoffe, vor allem Metalle, in einem Zylinder, der unten nur eine kleine Oeffnung besitzt, mit hohen Drucken (über 10000 Atmosphären) zusammendrückt, das Metall zu „fließen" beginnt und als Faden aus der Oeffnung herausgepreßt wird. Das herausgepreßte Metall hat nun oft eine geringere Dichte als das normale Metall. Spring sucht die Erscheinung folgendermaßen zu erklären: durch den hohen Druck werden die Metalle plastischer, sie nähern sich in gewissem Sinne dem flüssigen Zustand. Da dieser letztere durch eine Dichteabnahme gekennzeichnet ist,

findet sich das gleiche unter dem Einfluß hohen Druckes. Als Bestätigung dieser Auffassung kann gelten, daß Wismut, welches ja mit einer Dichtezunahme schmilzt, im herausgepreßten Zustand dichter ist als das normale Metall.

Es ist gegen diese Auffassung vielleicht mit Recht eingewandt worden, daß es zweifelhaft ist, ob man es tatsächlich mit der Wirkung allseitigen Druckes zu tun hat; denn an der Ausflußöffnung steht das Metall unter einem einseitigen Druck. Einige Versuche scheinen auch dafür zu sprechen, daß bei allseitigem hohen Druck keine derartig abnorme Dichteänderung zu beobachten ist.

Tammann und seine Schüler haben die Ausflußgeschwindigkeit der Metalle unter diesen Versuchsbedingungen gemessen und erhielten die bemerkenswerte Gesetzmäßigkeit, daß eine Temperatursteigerung von 10° eine Verdoppelung der Ausflußgeschwindigkeit bedingt, ganz wie es bei der Mehrzahl der chemischen Reaktionsgeschwindigkeiten gefunden wurde.

Was den Einfluß des allseitigen Drucks auf die Lichtbrechung angeht, so könnte man vielleicht erwarten, daß sich die Theorie hier unschwer allgemein geben ließe. Denn es existieren bekanntlich eine Reihe von Formeln, die den Brechungsindex n mit der Dichte ϱ verknüpfen. Angenommen der ganze Druckeinfluß beruhe darauf, daß durch die Kompression die Dichte geändert wird, so könnte man vermuten, daß durch diese Formeln ohne weiteres die Abhängigkeit vom Druck gegeben sei. Diese Formeln sind die von Gladstone und Dale $\frac{n-1}{\varrho} =$ konst., die von Newton $\frac{n^2-1}{\varrho} =$ konst. und die von Lorenz und Lorentz $\frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{\varrho} =$ konst., die aus der elektromagnetischen Lichttheorie abgeleitet wurde auf Grund der Annahme von Clausius und Mosotti, daß in einem Dielektrikum die leitenden, kugelförmigen Molekeln im nichtleitenden Lichtäther eingebettet sind. Es hat sich aber herausgestellt, daß keine der drei Formeln die Abhängigkeit der Lichtbrechung vom Druck bei Flüssigkeiten und festen Körpern wiedergibt; bisweilen stimmt eine von den beiden einfacheren Formeln angenähert, die theoretisch abgeleitete fast immer am schlechtesten. Man hat neuerdings die Ungültigkeit der Formel von Lorenz und Lorentz, gerade bei der Wiedergabe der Druckabhängigkeit, darauf geschoben, daß man mit Unrecht die Moleküle als Kugeln ansieht, und hat nun umgekehrt aus den Abweichungen auf ihre wahre Gestalt zu schließen versucht (O. Wiener).

Aehnliches gilt für die Dielektrizitätskonstante D, für die ebenfalls nach Clausius und Mosotti die Gleichung $\frac{D-1}{D+2} \cdot \frac{1}{\varrho} =$ konst. gelten sollte. Die durch den Druck bewirkte Aenderung ist bei Wasser und Alkohol ungeheuer viel kleiner als es die Formel fordern würde (Röntgen).

Eine sehr wichtige Eigenschaft der festen Körper ist, daß sie durch einseitigen Druck und Zug doppelbrechend werden, worauf schon kurz gelegentlich der Erörterung der Verschiebungselastizität von Flüssigkeiten hingewiesen wurde. Man spricht von positiver Doppelbrechung, wenn der ordentliche Strahl rascher fortgepflanzt wird wie der außerordentliche, im umgekehrten Fall von negativer. Der Gangunterschied der beiden Strahlen ist im allgemeinen dem Druck proportional. Die physikalische Seite dieser Erscheinung ist zum Teil sehr eingehend theoretisch ausgebildet worden, auch für den verwickelten Fall durch Druck doppelbrechend gewordener Kristalle (Pockels); aber über den Zusammenhang der Doppelbrechung mit den oben erörterten mechanischen Eigenschaften (Elastizität, Härte usw.) ist wenig bekannt, obwohl er fraglos ziemlich eng ist (siehe später). Das Vorhandensein der Doppelbrechung ist das sicherste Mittel, um in amorphen Stoffen die Gegenwart innerer Spannungen nachzuweisen, z. B. in rasch gekühlten Gläsern. Sie dürfte überhaupt besonders fruchtbar sein, um die Struktur der festen Stoffe aufzuklären.

Der Einfluß allseitigen Druckes auf die Farbe von Flüssigkeiten und festen Körpern ist noch kaum untersucht worden. Bekannt ist aber, daß durch einseitigen Druck manche feste Körper dichroïtisch werden, d. h. die beiden durch Doppelbrechung erzeugten Strahlen werden verschieden absorbiert. Besonders interessante Fälle dieser Art hat Ambronn beobachtet, z. B. an Gold- und Silberkristallen, die in den sehr engen, schwarz erscheinenden Räumen erzeugt wurden, welche beim Zusammenpressen eines Deckglases und eines Objektträgers entstehen.

Die natürliche Drehung der Polarisationsebene in Rohrzuckerlösungen wird durch Druck erhöht und zwar scheint die relative Zunahme von der Konzentration unabhängig zu sein.

Ueber die Wirkung des Druckes auf die Zähigkeit von Flüssigkeiten weiß man verhältnismäßig wenig. Wie man erwarten konnte, nimmt bei der Mehrzahl der untersuchten Flüssigkeiten die Zähigkeit mit steigendem Druck zu. Eine bemerkenswerte Ausnahme bildet wieder das Wasser, das bis zu einem Druck von 600 Atmosphären eine

Abnahme der Zähigkeit zeigt und zwar sinkt die Zähigkeit mit zunehmendem Druck immer weniger. Sehr auffallend ist auch die Temperaturabhängigkeit dieser Druckveränderlichkeit: bei + 2° ist die Abnahme der Zähigkeit mit steigendem Druck beträchtlich, bei 25° schon sehr gering und es läßt sich mit großer Wahrscheinlichkeit schließen, daß bei verhältnismäßig wenig höheren Temperaturen sich das Wasser normal verhält, d. h. die Zähigkeit steigt mit dem Druck (Röntgen, Warburg und Sachs, Cohen).

Der Wärmeausdehnungskoeffizient der Flüssigkeiten sinkt mit steigendem Druck. Eine merkwürdige Ausnahme bildet wieder das Wasser: bei Temperaturen unter 50° wächst der Ausdehnungskoeffizient mit steigendem Druck, bei Temperaturen darüber nimmt er wie bei den anderen Flüssigkeiten ab.

In engem Zusammenhang hiermit steht, daß die Temperatur des Dichtemaximums des Wassers mit steigendem Druck erniedrigt wird, und zwar ergibt sich nach van der Waals und Puschl hierfür die Formel

$$\frac{\triangle t_m}{\triangle p_m} = - \frac{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial p}\right)_\tau}{\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)_p};$$

Hier ist t_m die Temperatur des Dichtemaximums, p_m der Druck, der wirksam ist, α ist der Ausdehnungskoeffizient.

Die spezifische Wärme des Wassers sinkt mit steigendem Druck, und zwar erniedrigen sie 1000 Atmosphären um etwas über 4%.

Sehr mannigfaltige Beziehungen herrschen zwischen dem Druck und den elektrischen Eigenschaften der Stoffe. Zunächst wird durch allseitigen Druck der Widerstand der Metalle geändert und zwar hat man sowohl eine Abnahme wie eine Zunahme desselben bei verschiedenen Metallen gefunden. In sehr vielen Fällen läßt sich der Widerstand einfach als lineare Funktion von p darstellen, es gilt eine Gleichung $w = w_0(1 \pm \alpha p)$. α liegt in der Größenordnung von $1-50.10^{-6}$, und man hat daher mit Recht vorgeschlagen, diese Aenderung des Widerstandes zur Messung hoher Drucke (über 500 Atmosphären) zu verwenden. Manganin eignet sich wegen seiner Temperaturunempfindlichkeit da besonders (Lisell, Lafay).

Von den Wirkungen einseitigen Druckes auf die Leitfähigkeit der Metalle sei die folgende erwähnt: hartgezogene Drähte zeigen beim gelinden Anwärmen (50 bis 200°) eine Abnahme des Widerstandes. Die Abhängigkeit dieser Abnahme von der Zeit bei verschiedenen Temperaturen ähnelt auffallend der zeitlichen Aenderung der elastischen Nachwirkung bei den gleichen Temperaturen.

Auf die piezoelektrischen Erscheinungen, vor allem am Turmalin, dann auch allgemein an hemimorphen Kristallen sei hier nur hingewiesen.

Eng verknüpft sind auch mechanische und magnetische Eigenschaften. Wird ein längsmagnetischer Eisendraht gezogen, so nimmt seine Magnetisierungsstärke mit wachsender Zugkraft bis zu einem Maximum zu, um bei noch stärkerem Zug wieder bis unter den Ausgangswert zu sinken; ist der Eisendraht von vornherein stark magnetisiert, so beobachtet man bloß eine Abnahme der Magnetisierung beim Ziehen, eine Zunahme beim Zusammendrücken (Villari). Ein Nickeldraht verhält sich unter gewöhnlichen Umständen wie ein stark magnetisierter Eisendraht. Erzeugt man aber künstlich eine sehr schwache Magnetisierung, so findet man das gleiche Verhalten wie beim Eisen unter gewöhnlichen Umständen: die Kurve Magnetisierungsstärke-Zugkraft zeigt ein Maximum.

Ausgesprochen und wichtig ist auch der Einfluß der Torsion auf die Magnetisierung, die eingehend untersucht worden ist (Wiedemann, Zehnder). Die Verhältnisse sind aber zu verwickelt, als daß sie an dieser Stelle auseinandergesetzt werden könnten. Die durch Deformation von Drähten erzeugten elektrischen Ströme hängen eng damit zusammen, daß durch die mechanischen Eingriffe die Magnetisierung verändert wird.

2c) Einfluß des Druckes auf Phasengleichgewichte. Bisher ist der Einfluß mechanischer Wirkungen auf die Eigenschaften (im allgemeinen) einheitlicher chemischer Stoffe besprochen worden, die in einer einzigen Phase vorhanden waren. Im folgenden soll der chemische Stoff in mehr als einer Phase anwesend sein und es wird der Einfluß des Druckes auf die Verschiebung des Phasengleichgewichts erörtert (vgl. dazu die Artikel „Chemisches Gleichgewicht“ und „Phasenlehre“). Während im vorangehenden theoretisch wie experimentell nur sehr wenig bekannt war, sind im folgenden die Verhältnisse theoretisch wie experimentell so gut wie völlig geklärt.

Der Einfluß des Druckes auf den Siedepunkt einer Flüssigkeit ist allbekannt. Es ist der Siedepunkt ja die Temperatur, bei der die Dampfspannung den Wert des Atmosphärendrucks erreicht. Aendert sich dieser Druck, so ändert sich damit auch die Siedetemperatur und zwar hängt die Größe dieser Aenderung von der Dampfspannungskurve ab (vgl. den Artikel „Druck“).

Wichtig ist der Einfluß des Druckes auf den Schmelzpunkt, und zwar sollen nur die beiden Phasen Flüssigkeit und fester Stoff anwesend sein. Das oben erwähnte Prinzip von Braun und Le Chatelier

gibt Aufschluß über die eintretenden Gleichgewichtsverschiebungen. Erhöhung des Druckes begünstigt das System mit kleinerem Volum; ist die Flüssigkeit weniger dicht als das feste Eis, so wird die Bildung des letzteren begünstigt, der Schmelzpunkt erhöht; ist umgekehrt wie z. B. beim Wasser, die Flüssigkeit dichter, so wird ihre Bildung bevorzugt, der Schmelzpunkt also erniedrigt. Aus dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre folgt die Gleichung.

$$\Delta T = \frac{\Delta P . T(v_{fl} - v_f)}{r}$$

Wo ΔT die Temperaturänderung, ΔP die Druckänderung, T der Schmelzpunkt in absoluter Zählung, v_{fl}, v_f die spezifischen Volume des flüssigen und festen Stoffes, r die Schmelzwärme bedeuten. Es war dies eine der ersten Folgerungen aus dem zweiten Hauptsatze der Wärmelehre, die von James Thomson gezogen, von William Thomson und gleichzeitig von Bunsen glänzend bestätigt wurde. Daß Eis unter Druck schmilzt, ist für viele Naturerscheinungen bedeutungsvoll, z. B. für das Fließen der Gletscher.

Völlig die gleiche Beziehung gilt für den Einfluß des Drucks auf die Umwandlungstemperatur, d. h. die Temperatur, bei der sich eine feste Phase in eine andere feste Phase umwandelt, man muß nur statt der Schmelzwärme die Umwandlungswärme und ferner die spezifischen Volume der beiden festen Phasen einsetzen.

Wir kommen nun zur Frage nach dem Einfluß des Drucks auf die Koexistenz von drei und mehr Phasen bei nur einem chemischen Bestandteil. Diese Verhältnisse werden durch die sogenannte Phasenregel von Willard Gibbs geregelt, die für die Gleichgewichtsverhältnisse bei Gegenwart mehrerer Phasen von allgemeingültiger Bedeutung ist. Man gelangt zu ihr, wenn man überlegt, welche Bedingungen nach dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre erfüllt sein müssen, wenn mehrere chemische Bestandteile in mehreren Phasen vorhanden sind. Es ergibt sich zunächst, daß Druck und Temperatur maßgebend sind und daß sie beim Gleichgewicht im ganzen System den gleichen Wert haben müssen. Ferner zeigt sich, daß für jeden chemischen Bestandteil eine Bedingungsgleichung existiert, die seine Konzentration in der einen Phase mit der in je einer anderen verknüpft. Bekanntlich ist die Differenz aus der Zahl der vorhandenen Variabeln (Druck, Temperatur, Konzentrationen) und der Zahl der Gleichungen gleich der Zahl der Freiheiten. Man erhält so für die Zahl der Phasen P, die Zahl der Bestandteile n und die Zahl der Freiheiten F die Phasenregel

$$P + F = n + 2.$$

Hier bezieht sich die 2 auf die zwei Variabeln Druck und Temperatur.

Hat man nun den Fall der Koexistenz dreier Phasen bei einem einzigen Bestandteil, etwa Dampf, Flüssigkeit und Eis, so ergibt sich aus der Phasenregel, daß keine Freiheit vorhanden sein kann; d. h. es existiert nur ein Druck und eine Temperatur, bei denen alle drei nebeneinander beständig sind. Man nennt einen solchen Punkt einen Uebergangspunkt oder auch Tripelpunkt, wenn es sich um drei Phasen handelt. Für Wasser liegt er z. B. bei 4,57 mm Druck und + 0,0075° C.

Nun kann statt eines gleichförmigen Drucks ein ungleichförmiger wirken, wenn man z. B. in einem System Flüssigkeit — Dampf einen Stempel verwendet, der für den Dampf, nicht aber für die Flüssigkeit, durchlässig ist. Man hat es dann mit einer Pressung zu tun. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik führt zur Gleichung

$$\frac{\partial \pi}{\partial p} = \frac{\pi . M . v_{fl}}{RT}$$

hier ist π der Dampfdruck, p der Pressungsdruck, M das Molargewicht, v_{fl} das spezifische Volum der Flüssigkeit, R und T haben die bekannte Bedeutung. Da der Ausdruck rechts notwendig positiv ist, so muß der Dampfdruck beim Pressen ansteigen.

Ganz ähnliche Ueberlegungen gelten für die Pressung bei anderen Phasenpaaren.

2d) Einfluß des Drucks auf nicht disperse chemische Systeme mit mehreren Komponenten. Wir gelangen nun zu einphasigen Systemen, die mehrere in einem chemischen Gleichgewicht stehende Bestandteile enthalten. Auch hier gibt das Braun-Le Chateliersche Prinzip Aufschluß über den Einfluß des Drucks. Man habe in einem Gasraume zwischen den Stoffen A, B und C, D... das chemische Gleichgewicht

$$mA + nB + \ldots \rightleftarrows qC + rD \ldots,$$

wo m, n, q, r Molzahlen bedeuten; dann ist nach dem Massenwirkungsgesetz die Gleichgewichtskonstante

$$K = \frac{(A)^m . (B)^n \ldots}{(C)^q . (D)^r \ldots}$$

hier soll die Umklammerung anzeigen, daß es sich um Konzentrationen handelt. Nach dem zweiten Hauptsatz gilt nun die Beziehung

$$\frac{dK}{dp} = \frac{K . \Delta v}{RT};$$

R und T haben die bekannte Bedeutung, Δv ist die Volumzunahme, die man beim Fortschritt der Reaktion um ein Mol beobachtet. Man sieht, der Druck begünstigt wieder das System mit kleinerem Volum. Denn tritt z. B. eine Volumzunahme ein,

wenn die Reaktion von links nach rechts verläuft, so muß — damit K zunehmen kann — die Konzentration von A und B wachsen, d. h. es wird das System mit dem kleineren Volum begünstigt.

Bei ziemlich verdünnten Gasen, für die die Gasgesetze gelten, kann unschwer der Fall eintreten, daß $\varDelta v = 0$ ist, daß keine Volumänderung statthat; dann wird $\frac{dK}{dp} = 0$, d. h. die Gleichgewichtskonstante ändert sich nicht mit dem Druck. Dies ist z. B. bei der Reaktion

$$2JH = J_2 + H_2$$

der Fall.

Umgekehrt ist natürlich bei Reaktionen mit starker Volumänderung der Einfluß des Druckes beträchtlich. So hat man bei der technischen Gewinnung des Ammoniaks aus den Elementen

$$N_2 + 3H_2 = 2NH_3$$

mit Vorteil von hohen Drucken Gebrauch gemacht. Da die Dissoziation (vgl. den Artikel „Dissoziation") eines Gases in der Mehrzahl der Fälle mit einer Volumvermehrung verbunden ist, so wird sie meist von hohen Drucken nicht begünstigt.

Ganz die gleiche Beziehung läßt sich auf ein chemisches Gleichgewicht in verdünnter Lösung anwenden, sofern für die gelösten Stoffe die van't Hoffschen Gesetze anwendbar sind. So fand Fanjung eine quantitative Bestätigung der oben erwähnten Formel für den Einfluß des Drucks auf die elektrolytische Dissoziation der Essigsäure

$$CH_3COOH \leftrightarrows CH_3COO' + H^{\cdot}.$$

Auch auf mehrphasige Systeme, in denen chemische Gleichgewichte herrschen, finden die erörterten Prinzipien ohne weiteres Anwendung. Zunächst gibt die Phasenregel an, welche Art von Druckveränderlichkeit bei verschiedener Phasenzahl möglich ist. Es liegt alles ganz so, wie oben im Fall der Systeme mit einem Bestandteil; nur werden natürlich bei mehreren Bestandteilen die Verhältnisse verwickelter: es ist nämlich ein Quadrupelpunkt ein Uebergangspunkt, und die Abhängigkeit einer Löslichkeitskurve vom Druck — bei der drei Phasen, fest, flüssig, gasförmig, vorhanden sein sollen — entspricht der des Schmelzpunktes vom Druck.

Es mag nur noch kurz auf den Einfluß des Drucks auf die Löslichkeit eines festen Stoffes in einem Lösungsmittel eingegangen werden. Das Prinzip von Braun und Le Chatelier führt zum Ergebnis, daß die Löslichkeit mit dem Druck steigen muß, wenn die Bildung der Lösung mit einer Kontraktion verbunden ist, während sie sinkt, wenn eine Volumzunahme statthat. Quantitative Beziehungen ergeben sich in ähnlicher Weise, wie sie oben mehrfach erörtert wurden.

Haben wir es aber mit einem ungleichförmigen Druck, einer Pressung zu tun, wird etwa der feste Stoff durch einen für die Lösung durchlässigen Stempel komprimiert, so findet, wie im oben besprochenen Fall der Pressung einer Flüssigkeit, stets eine Steigerung der Löslichkeit mit wachsendem Druck statt. Man erhält ganz die gleiche Formel wie im oben erwähnten Fall — vorausgesetzt, daß die van't Hoffschen Lösungsgesetze gelten —, man muß nur statt des Dampfdrucks die Löslichkeit, statt des spezifischen Volums der Flüssigkeit das des festen Körpers setzen.

Die Grenzflächenspannung zwischen zwei flüssigen Phasen läßt sich durch Druck verändern. Das Phänomen ist ziemlich verwickelt, denn man hat die Aenderung des Volums und die Aenderung der Löslichkeit in beiden Phasen zu berücksichtigen. Die kritische Mischungstemperatur zweier Flüssigkeiten wird durch Druck nur wenig verändert.

Der Einfluß des Drucks auf die Leitfähigkeit von Elektrolytlösungen ist ziemlich verwickelt; man hat ihn aber verhältnismäßig eingehend untersucht und deshalb größtenteils aufgeklärt. Die Aenderung der Leitfähigkeit durch den Druck hängt von mehreren Faktoren ab: der Aenderung des Volums — denn dadurch wird die Konzentration geändert — der Aenderung der Reibung, die die Ionen erfahren — diese hängt eng mit der Zähigkeit der Lösungsmittel zusammen — der Aenderung des Dissoziationsgrades, eventuell noch der Aenderung des Dissoziationsgrades der Lösungsmittel und der Reibung seiner Ionen. Vernachlässigt man den letzten Faktor und nennt λ die Leitfähigkeit, v das Volum, η die Reibung der Ionen und α den Dissoziationsgrad, so hat man für die relative Aenderung der Leitfähigkeit

$$\frac{1}{\lambda}\frac{d\lambda}{dp} = -\frac{1}{v}\frac{dv}{dp} - \frac{1}{\eta}\frac{d\eta}{dp} + \frac{1}{\alpha}\frac{d\alpha}{dp}$$

Bei großer Verdünnung ist die Dissoziation praktisch vollständig, man hat es also nur mit den beiden ersten Ausdrücken zu tun. Bekanntlich ist bei gewöhnlichem Druck die Grenzleitfähigkeit eines Normalelektrolyten in verschiedenen Lösungsmitteln der Zähigkeit der letzteren umgekehrt proportional und man schloß daraus, daß die Ionen eine Reibung erfahren, die der gleich ist, welche die Moleküle des Lösungsmittel selbst erfahren; es bestätigte dies die Annahme, daß die Ionen hydratisiert sind, d. h. mit Molekülen des Lösungsmittels verbunden sind. Danach konnte man vermuten, daß die Aenderung, die die Ionenreibung mit dem Druck erleidet, nicht verschieden ist

von der, die das Lösungsmittel erleidet. Diese Vermutung stimmt nur in sehr begrenztem Umfang (z. B. bei NaCl). Es ist also anzunehmen, daß auch die Hydratation der Ionen durch Druck geändert wird und die Ionenreibung deshalb nicht genau in der gleichen Weise vom Druck beeinflußt wird wie die Zähigkeit der Lösungsmittel.

Beim Wasser hat bei niederem Druck $\frac{d\eta}{dp}$ dasselbe Vorzeichen wie $\frac{dv}{dp}$, bei höherem Druck wird $\frac{d\eta}{dp}$ positiv; demgemäß zeigen die λ-p-Kurven ein Maximum. Bei anderen Lösungsmitteln überwiegt der Ausdruck mit $\frac{d\eta}{dp}$ den mit $\frac{dv}{dp}$ weit und $\frac{d\eta}{dp}$ ist positiv; die Leitfähigkeit nimmt also stark mit steigendem Druck ab.

In größeren Konzentrationen und bei schwachen Elektrolyten kommt die Aenderung des Dissoziationsgrades α mit dem Druck in Betracht, die schon oben erörtert wurde. $\frac{d\alpha}{dp}$ ist positiv, da die Dissoziation mit Volumabnahme verknüpft ist. Dies bedingt beim Wasser ein starkes Zunehmen der Leitfähigkeit. Und auch in anderen Lösungsmitteln kann bei schwachen Elektrolyten der Einfluß des α-Gliedes so überwiegen, daß statt der sonst vorhandenen Abnahme der Leitfähigkeit eine Zunahme eintritt.

Gut vertraut ist man auch in vieler Hinsicht mit dem Einfluß des Drucks auf die elektromotorische Kraft galvanischer Ketten (vgl. den Artikel „Galvanische Ketten"). Es lassen sich ähnliche Ueberlegungen anstellen, wie sie oben bei der Erörterung des Einflusses des Drucks auf chemische Gleichgewichte erwähnt wurden. Man erhält dann, wenn man den Einfluß des Drucks auf die Kompressibilität des Systems vernachlässigt, eine Gleichung

$$E_p - E_o = p\,(v_1 - v_2);$$

hier ist E_p und E_o die elektromotorische Kraft bei den Drucken p und o, v_1 und v_2 sind die Volume der reagierenden Stoffe vor und nach dem Durchgang von 96540 Coulombs (vgl. den Artikel „Elektrochemie"). Die Gleichung wurde gut bestätigt (Cohen).

Durch Messung der Druckabhängigkeit der elektromotorischen Kraft galvanischer Ketten lassen sich noch andere Druckabhängigkeiten erfolgreich bestimmen, z. B. die der Löslichkeit und die des Umwandlungspunktes (Cohen).

Weniger einfach liegen die Verhältnisse bei der Wirkung einseitigen Drucks. Oben wurde die abnorme Dichte von Metallen erwähnt, die bei hohen Drucken aus einer Oeffnung gepreßt worden waren. Da ein solch gepreßtes Metall von selbst bei gelindem Erwärmen in den normalen Zustand zurückkehrt, so ist verständlich, daß es gegen ein normales Metallstück in die gleiche Metallsalzlösung getaucht einen Potentialunterschied zeigt (vgl. den Artikel „Potential").

Elektromotorische Kräfte erhält man auch, wenn man einen Metalldraht als Elektrode in der gleichen Metallsalzlösung zieht oder preßt, oder ein spiralig gewundenes Metallblech biegt oder dehnt. Die Erscheinungen sind noch wenig erforscht. Möglicherweise hängen sie mit kapillarelektrischen Vorgängen zusammen.

Daß in festen Systemen durch Druck Gleichgewichtsverschiebungen eintreten, dürfte schon oft beobachtet worden sein, wenn auch eine zuverlässige Feststellung experimentell selten möglich war. Ein eigentümliches Beispiel mag erwähnt werden: Waentig fand, daß die phosphoreszierenden Erdalkalisulfide, die bekanntlich stets kleine Mengen Schwermetall enthalten, beim Drücken mit dem Pistill aufhören zu phosphoreszieren und dabei ihre Körperfarbe ändern. Beim Erwärmen werden sie wieder phosphoreszierend. Man kann Temperaturen finden, bei denen sowohl ein stark leuchtendes Präparat durch mechanische Wirkung beeinflußt wird, wie auch ein nichtleuchtendes wieder zum stärkeren Phosphoreszieren gebracht wird. Dies deutet auf Gleichgewichtsverschiebungen hin.

Ueber den Einfluß des Drucks auf Reaktionsgeschwindigkeiten (vgl. den Artikel „Chemische Kinetik") ist verhältnismäßig wenig bekannt. Daß bei Gasreaktionen eine merkbare Wirkung vorhanden ist, weiß man; so können z. B. explosive Gasgemenge wie Knallgas durch bloße Erhöhung des Drucks zur Reaktion gebracht werden. Wie weit ein spezifischer Einfluß des Drucks auf die Reaktionsgeschwindigkeitskonstante vorliegt, steht nicht fest, da man bei diesen Reaktionen die Beeinflussung anderer Faktoren wie Adsorption usw. nicht ohne weiteres ausscheiden kann.

Nicht recht durchsichtig liegen die Verhältnisse in homogener flüssiger Lösung. Untersucht wurden allerdings ziemlich verwickelte Reaktionen: die Katalyse der Ester durch Säuren und die Rohrzuckerinversion. Im ersten Fall tritt eine Beschleunigung der Reaktion ein, und zwar ungefähr in einem solchen Betrag, daß man die Wirkung wesentlich auf die Vermehrung der $H^{\cdot}$-Ionen schieben kann, wie sie die durch den Druck erhöhte Dissoziation der Säure erzeugen muß. Bei der Zuckerinversion tritt aber eine Verminderung der Reaktionsgeschwindigkeit durch Erhöhung des Druckes ein. Die Beein-

flussung der Dissoziation der Säure ist also nicht der einzige Faktor. Man hat es entweder mit einer spezifischen Veränderung der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten zu tun oder mit einer durch Gleichgewichtsverschiebung hervorgerufenen Konzentrationsänderung des wirklich reagierenden Stoffes (bekanntlich wahrscheinlich ein Hydrat des Rohrzuckers bezw. eine Verbindung desselben mit H'-Ion). Jedenfalls bedarf man noch Untersuchungen, bei denen der Einfluß des Drucks bei möglichst einfachen Reaktionen verfolgt wird, so daß man nicht mit unbekannten Zwischenreaktionen zu rechnen braucht wie im Fall der bisher nur untersuchten Katalysen.

Spring hat eine beträchtliche Zahl von Versuchen derart angestellt, daß er Stoffe, die in Lösung reagieren, in Pulverform starken Drucken aussetzte; sie gaben dann gleichfalls Verbindungen. Wie weit hierbei der Druck unmittelbar die Reaktionsgeschwindigkeit beeinflußt, läßt sich nicht erkennen, da die Wirkung zum Teil auch darauf beruht, daß bei der möglichst nahen Berührung der Teilchen die Diffusion sehr begünstigt wird. Uebrigens sind die Versuche nicht unwidersprochen geblieben.

2e) Einfluß des Druckes auf disperse Systeme. Es müssen jetzt noch Systeme besprochen werden, die sich dadurch auszeichnen, daß bei ihnen eine Phase in äußerst feiner Verteilung (die Teilchen sind von der Größenordnung der Lichtwellenlänge) in einer anderen sich vorfindet; es sind das die kolloiden Lösungen im weitesten Sinn (vgl. den Artikel „Disperse Systeme“). Zuerst sind die Sole zu betrachten, bei denen kleine Teilchen eines festen Stoffes oder einer Flüssigkeit in einer zweiten Flüssigkeit verteilt sind. Ueber deren Kompressibilität ist wenig und kaum etwas Charakteristisches bekannt, ebensowenig über den Einfluß des Druckes auf ihre anderen Eigenschaften.

Wohl aber wurde schon oben erwähnt, daß sich manche von ihnen in auffallender Weise dadurch auszeichnen, daß sie doppelbrechend werden, wenn man in ihnen Verschiebungselastizität nachzuweisen sucht, im Gegensatz zu den homogenen Flüssigkeiten. Diese Eigenschaften zeigen z. B. die Sole von Gelatine, Tragant, Kirschgummi u. a. m. Es rührt dies fast sicher daher, daß die zähflüssigen, in dem Medium verteilten Teilchen und Tröpfchen deformiert und so doppelbrechend werden. Denn der Sinn der Doppelbrechung ist der gleiche, wie ihn die genannten Stoffe in amorph-festem Zustand haben. Uebrigens läßt sich bei vielen dieser Sole die Verschiebungselastizität unmittelbar durch Torsionsversuche an einem eingetauchten Zylinder (oder Kugel) nachweisen.

Viele Kolloidlösungen (z. B. von Eiweiß, Peptonen u. a. m.), aber auch manche wahre Lösungen, bei denen der gelöste Stoff Neigung zeigt, in den kolloiden Zustand überzugehen, haben die Eigenschaft, feste Häutchen auf ihrer Oberfläche zu erzeugen, deren Festigkeit und Verschiebungselastizität man durch Torsion einer in die Oberfläche eingetauchten Scheibe nachweisen kann. Die Dicke dieser Häutchen ist oft äußerst gering (bis zu 1 bis 3 $\mu\mu$ herab) und ihr Auftreten ist physiologisch von Bedeutung.

Mehr ist über die Gele zu sagen. Man versteht darunter zweiphasige Systeme, bei denen eine Flüssigkeit äußerst fein in einem Gerüst eines meist amorph-festen Stoffes verteilt ist. Die Kompressibilität läßt sich bei einem Gel nicht ohne weiteres in der Weise messen, daß man unter Vermittelung einer Quecksilbersäule einen Druck auf einen festgelagerten Gelzylinder ausübt. Man beobachtet dann vielmehr ein recht eigentümliches Verhalten (konisches Eindringen des Quecksilbers, Abschnüren kleiner Tröpfchen, die mit großer Gewalt in das Gel hineingeschleudert werden u. a. m.), das sich wohl erklären läßt, wenn man bedenkt, daß sowohl der allseitig in einer Flüssigkeit sich fortpflanzende Druck wie auch die nicht allseitig gleich starke Beanspruchung der Gelwände in Frage kommt (Barus).

Sehr bequem läßt sich bei einseitigem Druck und Zug der Elastizitätskoeffizient der Dehnung und die mechanisch hervorgerufene Doppelbrechung an Gelen z. B. von Gelatine, messen. Vergleicht man Gele von verschiedenem Gelatinegehalt, so ergibt sich, daß der Elastizitätskoeffizient dem Quadrat des Gehalts proportional ist, die spezifische Doppelbrechung (eine von der Dehnung unabhängige, leicht ableitbare Größe) dem Gehalt direkt proportional ist. Letztere ist also der Wurzel aus dem Elastizitätskoeffizienten proportional.

Man würde aber fehlgehen, wenn man die Doppelbrechung als eindeutig durch den Elastizitätskoeffizienten gegeben ansehen wollte. Es gibt z. B. Stoffe wie Glyzerin und Zucker, die die Doppelbrechung verringern, während sie die Elastizität erhöhen u. a. m. Und es muß notwendig so sein, denn es zeigt sich, daß bei gleichbleibender Dehnung die Doppelbrechung im Laufe der Zeit abnimmt, d. h. die innere Spannung gleicht sich aus. Reiger hat versucht, aus der zeitlichen Aenderung der Doppelbrechung die oben erwähnte Relaxationszeit für Gele zu bestimmen.

An Gelen lassen sich besonders leicht Pressungen ausführen. Man braucht bloß z. B. einen Stempel aus Ton zu benutzen, so erreicht man, daß die Flüssigkeit heraus-

gepreßt wird, während das amorph-feste Gerüst flüssigkeitsärmer zurückbleibt. Besonderes Interesse gebührt der Umkehrung dieses Pressungsdruckes, dem Quellungsdruck. Bringt man z. B. auf den Boden einer mit einem Steigrohr versehenen Tonzelle eine Schicht trockenen Gelatinegels, füllt den Rest der Zelle und das Steigrohr mit Quecksilber und taucht die Tonzelle in Wasser, so dringt dies durch den Ton zur Gelatine, läßt sie quellen, und bedingt eine Volumzunahme des Gels die von dem auf dem Gel ruhenden Druck abhängt. Man kann so mit einer etwas abgeänderten Anordnung Quellungsdrucke messen, die wahrscheinlich manchen Aufschluß geben werden über die Natur der Gele und den Einfluß, den z. B. Salze und andere Stoffe auf ihre Eigenschaften ausüben.

Bemerkenswerte mechanochemische Erscheinungen findet man an einigen noch verwickelteren dispersen Systemen. Man kann Gelatinegele erzeugen, die in äußerst feiner Verteilung Gold- oder Silberteilchen enthalten. Läßt man ein solches Gel quellen, dehnt es und läßt es dann trocknen, so erweist es sich als dichroitisch. Offenbar erzeugt die durch die Dehnung hervorgerufene innere Spannung Doppelbrechung und die beiden Strahlen werden verschieden absorbiert. Aehnliches beobachtet man u. a. am blauen Steinsalz; dies enthält sehr wahrscheinlich nach den Untersuchungen Siedentopfs ultramikroskopische Natriumteilchen. Auch hier entsteht beim Drücken in einer bestimmten Richtung Dichroismus.

3. Binnendrucktheorie der Lösungen. An diese reine Mechanochemie läßt sich nun zweckmäßig ein anderes Erscheinungsgebiet anknüpfen. Es wurde oben schon erwähnt, daß bei Flüssigkeiten der Ausdruck $K = \frac{a}{v^2}$, der Binnendruck, große Werte annimmt und daß er eine charakteristische Konstante der Flüssigkeiten ist, die aber bisher nicht hat unmittelbar bestimmt werden können. Man kann aber in einer mehr mittelbaren Weise vom Binnendruck Gebrauch machen und gelangt so zu Erscheinungsgebieten, die man deswegen gut mit der Mechanochemie in Berührung setzt, weil man stets bei ihm auf die analogen Wirkungen von Druck und anderen mechanischen Größen zurückgreift.

Der Binnendruck und Binnendrucksänderungen sind nicht meßbar. Tammann sucht diese Schwierigkeit zu umgehen durch folgende Annahme: eine Flüssigkeit, die durch Erhöhung oder Erniedrigung des äußeren Drucks ihre Eigenschaften um bestimmte Beträge verändert, würde sie um die gleichen Beträge ändern, wenn ihr Binnendruck so stark wie der äußere Druck erhöht oder erniedrigt würde. Aenderungen des äußeren Druckes sollen also solchen des Binnendrucks gleichwertig sein. Eine Aenderung des Binnendrucks tritt nun ein, wenn ein Stoff in der Flüssigkeit aufgelöst wird. Tammann entwickelt daher auf der eben aufgestellten Annahme fußend, eine weiter reichende Theorie der Lösungen. Die van't Hoffsche Theorie verdünnter Lösungen nimmt bekanntlich die Flüssigkeit als inkompressibel an; sie kann deshalb nichts aussagen über die Aenderung der Kompressibilität des Lösungsmittels durch den gelösten Stoff noch über irgendeine andere Eigenschaft, die mit der Kompressibilität zusammenhängt.

Hier sucht Tammanns Theorie weiterzuführen. Er zeigt u. a., daß die Isobaren — die Volum-Temperatur-Kurven bei konstantem Druck — des Wassers bei verschiedenem Druck einen ganz analogen Verlauf haben wie die Isobaren einer Lösung von verschiedener Konzentration unter konstantem äußeren Druck. Berechnet man aus dem Isobarendiagramm des Wassers den Druck, den man für eine gegebene Lösung nötig hätte, so genügt tatsächlich die Annahme eines einzigen Drucks — d. h. einer bestimmten Binnendrucksvermehrung — um die Isobaren der Lösung darzustellen.

Die Erniedrigung der Temperatur des Dichtemaximums des Wassers durch Druck entspricht weitgehend der durch Auflösung von Salzen bewirkten Erniedrigung. Auch hier ist die zahlenmäßige Uebereinstimmung befriedigend.

Das gleiche gilt für die Aenderung der Kompressibilität des Wassers unter Druck und ihrer Aenderung durch die Auflösung von Salzen, wie für die Aenderung der spezifischen Wärme des Wassers unter Druck und deren Aenderung durch die Auflösung von Salzen.

Wenn man auch viele hiermit zusammenhängende Erscheinungen (der Einfluß des Druckes auf die Reaktionsgeschwindigkeit, die Beeinflussung der Quellung von Gelatine durch Salze u. a. m.) noch nicht ausreichend auf Grund dieser Tammannschen Theorie erklären kann und man jedenfalls die Annahme von Hydraten usw. hinzunehmen muß, so hat sie doch quantitativ weitergeführt als irgendeine andere Theorie.

4. Kapillarchemie. 4a) Die Grenzfläche ist flüssig-gasförmig. Statt unmittelbar an Druckwirkungen anzuknüpfen, kann man auch in einer mehr mittelbaren Weise Größen betrachten, die mit dem Binnendruck zusammenhängen. Eine solche ist, wie schon erwähnt, die Oberflächenspannung, allgemein die Grenzflächen-

spannung. Man bezeichnet das Kapitel der physikalischen Chemie, das sich mit den Beziehungen zwischen der Grenzflächenspannung und den chemischen Erscheinungen befaßt, zweckmäßig als Kapillarchemie und kann diese, oder wenigstens einen beträchtlichen Teil derselben, an die Mechanochemie anknüpfen.

Die Existenz einer Oberflächenspannung, die an der Grenze zwischen einer Flüssigkeit und ihrem Dampf herrscht, kann man sich am einfachsten folgendermaßen klarmachen: eine Flüssigkeit nimmt in einem Dampfraum sich selbst überlassen, Kugelform an; die Kugel hat bei gegebenem Volum die kleinste Oberfläche. Es existiert also ein Bestreben die Oberfläche zu verkleinern, es muß Arbeit kosten sie zu vergrößern. Die Oberflächenspannung ist nichts anderes als die mechanische Arbeit, die aufgewandt werden muß, um ein Quadratzentimeter neuer Oberfläche zu erzeugen. Man muß also Arbeit leisten, wenn man Teilchen einer Flüssigkeit aus dem Innern an die Oberfläche bringt; da der Binnendruck die Kraft ist, mit der die außen befindlichen Flüssigkeitsteilchen nach innen gezogen werden, so ist der enge Zusammenhang zwischen Binnendruck und Oberflächenspannung einleuchtend.

Während der Binnendruck nicht direkt meßbar ist, gibt es viele Methoden, um die Oberflächenspannung unmittelbar zu messen. Sie bestimmt ja die Gestalt eines Flüssigkeitsvolums und man kann deshalb grundsätzlich aus jeder Gestalt, die ein Flüssigkeitsvolum einnimmt, die Oberflächenspannung ableiten, zunächst aus Gleichgewichtsformen, aus der Gestalt des Meniskus, der Tropfen und Blasen, der Steighöhe in einem Kapillarrohr u. a. m., dann aus Bewegungsformen, aus der Gestalt der Kräuselungen einer Oberfläche, der schwingenden Tropfen und Strahlen u. a. m. Bei all diesen Methoden ist zweierlei zu unterscheiden: Methoden, bei denen nur die Phasen Flüssigkeit und Dampf auftreten, und solche, bei denen auch feste Wände in Frage kommen; im letzteren Fall ist die Benetzung zu berücksichtigen. Ferner hat man zu unterscheiden zwischen statischen Methoden, bei denen eine ruhende, sich nicht ändernde Grenzfläche vorhanden ist, und dynamischen, bei denen die Grenzfläche während der Messung sich mehr oder minder rasch erneuert.

Betrachten wir nun zunächst die Oberflächenspannung einer Flüssigkeit gegen ihren Dampfraum. Versuche dieser Art sind nicht zahlreich, gewöhnlich hat man die Oberflächenspannung gegen Luft gemessen; der Unterschied zwischen beiden ist meist unbedeutend. Die Oberflächenspannung ist als Spannung eine Kraft pro Streckeneinheit; man mißt sie zweckmäßig in Dynen pro cm. Die Werte, die man findet, liegen in einem weiten Zahlenbereich und hängen vor allem von dem Siedepunkt oder dem kritischen Punkt der Flüssigkeit ab. Geschmolzene Metalle haben meist Werte zwischen 500 bis 1000 dyn/cm, geschmolzene Salze kleinere, Wasser bei Zimmertemperatur etwa 75 dyn/cm, organische Flüssigkeiten zwischen 20 bis 40 dyn/cm, verflüssigte Gase zwischen 2 bis 10 dyn/cm.

Die Oberflächenspannung nimmt mit steigender Temperatur nach einer linearen Funktion ab: es gilt also eine Beziehung $\sigma_t = \sigma_0(1-\gamma t)$, wo σ_t und σ_0 die Oberflächenspannungen bei t^0 und 0^0, γ einen Koeffizienten darstellen. Bei der kritischen Temperatur verschwindet die Trennungsfläche Flüssigkeit—Gas, die Oberflächenspannung wird dort Null. Man kann aber aus der oben erwähnten Gleichung den Wert der kritischen Temperatur für $\sigma_t = 0$ nur ungenau berechnen, weil die σ-t-Grade die Temperaturachse im kritischen Punkt nicht in einem Winkel schneidet, sonden sich in der Nähe desselben krümmt und den Nullwert berührend erreicht.

Wenn man die Temperaturen von einer dieser Krümmung entsprechenden kritischen Temperatur aus rechnet und statt der Oberflächenspannungen die sogenannte molekulare Oberflächenenergie benutzt, das ist das Produkt aus der Oberflächenspannung und der Oberfläche der Kugel, die ein Mol der Flüssigkeit enthält, so ergibt sich, daß der dann auftretende Koeffizient für viele Flüssigkeiten denselben Wert hat. Ist M das Molekulargewicht der Flüssigkeit, ϱ ihre Dichte, so ist — wie leicht einzusehen — $\left(\frac{M}{\varrho}\right)^{2/3}$ die Oberfläche der molekularen Kugel, $\sigma.\left(\frac{M}{\varrho}\right)^{2/3}$ die molekulare Oberflächenenergie; ist ferner T_k die kritische Temperatur in absoluter Zählung, T die des Versuchs und δ die oben erwähnte Korrektur, so gilt die Gleichung

$$\sigma\left(\frac{M}{\varrho}\right)^{2/3} = k(T_k - T - \delta)$$

k hat für die sogenannten normalen Flüssigkeiten einen Wert von etwa 2,1; die assoziierten Flüssigkeiten bilden Ausnahmen. Es ist dies die Regel von Eötvös und Ramsay-Shields, die das Molekulargewicht von Flüssigkeiten zu berechnen erlaubt. Sie läßt sich übrigens aus der Gleichung von van der Waals herleiten.

Auf die Beziehung zwischen Oberflächenspannung, Kompressibilität und Löslichkeit wurde schon oben hingewiesen.

Die Abhängigkeit der Oberflächenspannung organischer Verbindungen von ihren Komponenten ist nicht von besonderem In-

teresse. Man muß zum Vergleich Funktionen der Oberflächenspannung nehmen, die von der Temperatur unabhängig sind; es eignen sich verschiedene dazu, auf die einzugehen hier zu weit führen würde. Es ergibt sich im allgemeinen ein additives Verhalten mit konstitutivem Einschlag.

Wichtig ist eine Beziehung zwischen Oberflächenspannung und Dampfdruck. Aus dem zweiten Hauptsatze der Wärmelehre folgt nämlich, daß kleine Tropfen einen größeren Dampfdruck haben als große bezw. eine ebene Oberfläche und daß die Vergrößerung des Dampfdrucks von der Oberflächenspannung abhängt; dies bedingt z. B. daß ein Beschlag von kleinen Tröpfchen sich im Laufe der Zeit zu einem größeren Tropfen vereinigt. Die zuerst von W. Thomson abgeleitete Formel lautet:

$$p_r = p + \frac{2\,\sigma\varrho_{fl}}{\varrho_d r}$$

hier ist p der gewöhnliche Dampfdruck, p_r der des Tropfens mit dem Radius r, σ die Oberflächenspannung, ϱ_d, ϱ_{fl} die Dichte on Dampf und Flüssigkeit.

Die Oberflächenspannung von Lösungen zeigt ziemlich verwickelte Verhältnisse. Zunächst ist es hier nicht gleichgültig, ob man nach einer statischen oder dynamischen Methode die Oberflächenspannung mißt. Es folgt nämlich aus thermodynamischen Ueberlegungen, daß, wenn ein gelöster Stoff die Oberflächenspannung der reinen Flüssigkeit verändert, er notwendig in anderer Konzentration in der Grenzfläche vorhanden ist als im Innern der Flüssigkeit. Da dieser Vorgang der Konzentrationsänderung nicht unbegrenzt rasch verläuft, so kommt es, daß man mit einer dynamischen Methode, bei stets sich erneuernder Oberfläche, andere Werte der Oberflächenspannung findet als bei einer statischen, bei der man den Gleichgewichtszustand abwartet. Von der dynamischen Oberflächenspannung weiß man wenig, im nachfolgenden handelt es sich nur um die statische. Die Formel für diese Konzentrationsänderung, zu der die Thermodynamik führt, lautet

$$u = -\frac{c}{RT}\,\frac{d\sigma}{dc}$$

Hier ist u der Ueber- oder Unterschuß an gelöstem Stoff in der Oberfläche über die normal dort vorhandene Menge pro Flächeneinheit gerechnet, σ ist die Oberflächenspannung, c die Konzentration in der Lösung, R ist die Gaskonstante, T die absolute Temperatur.

Aus thermodynamischen Ueberlegungen ergibt sich nun auch, daß ein gelöster Stoff in kleiner Konzentration wohl die Oberflächenspannung einer reinen Flüssigkeit stark erniedrigen kann, nicht aber sie stark zu erhöhen vermag. Daher kommt es, daß, wenn man die Oberflächenspannungen als Ordinaten, die Konzentrationen als Abszissen aufträgt, die Kurven fast ausnahmslos gegen die Konzentrationsachse konvex sind oder ein Minimum zeigen. Ein allgemeiner analytischer Ausdruck für die Abhängigkeit der Oberflächenspannung von der Konzentration ist nicht bekannt. Häufig genügt für einen Bereich kleiner Konzentrationen für die Erniedrigung der Oberflächenspannung eine Gleichung der Form

$$\sigma_0 - \sigma_L = s c^{\frac{1}{n}};$$

hier ist σ_0 die Oberflächenspannung des reinen Mediums, σ_L die der Lösung; c ist die Konzentration, s und $\frac{1}{n}$ sind Konstanten; und zwar variiert $\frac{1}{n}$ meist wenig von Stoff zu Stoff und hat meist einen Wert zwischen 0,2 und 1. Eine solche Gleichung gilt z. B. für die Erniedrigung der Oberflächenspannung des Wassers durch organische Stoffe wie Fettsäuren, Amine, Alkohole u. dgl., die man zweckmäßig als kapillaraktiv bezeichnen kann. Anorganische Salze erhöhen die Oberflächenspannung des Wassers in geringem Maße nach einer linearen Funktion; sie sind nicht kapillaraktiv.

Da, wie hier erwähnt, nur starke Erniedrigungen der Oberflächenspannung durch gelöste Stoffe entstehen können, ist das $\frac{d\sigma}{dc}$ in der eben genannten Gleichung nur groß, wenn negativ, das u wird also nur groß, wenn positiv; es kann also eine merkbare Anreicherung von gelöstem Stoff in der Oberfläche statthaben. Es ist nun in der Tat mehrfach nachgewiesen worden, daß bei Stoffen, die die Oberflächenspannung des Wassers stark erniedrigen wie Amylalkohol, Saponin u. a. der Schaum reicher an gelöstem Stoff ist als die Masse der Flüssigkeit.

Was den Einfluß der Temperatur, und den Zusammenhang mit der Kompressibilität und Löslichkeit angeht, so gilt für Lösungen das gleiche, was oben für reine Flüssigkeiten ausgeführt wurde.

Wenn neben dem Dampf der Flüssigkeit noch ein anderer Stoff im Gasraum anwesend ist, so hat man für diesen mit den gleichen Umständen zu rechnen, wie für einen gelösten Stoff: beeinflußt sein Partialdruck im Gasraum die Oberflächenspannung, so ist seine Dichte an der Oberfläche eine andere als im Gasraum. Ueber den Einfluß von Gasen auf die Oberflächenspannung ist sehr wenig bekannt; man weiß u. a. nur, daß die Oberflächenspannung des Quecksilbers von der Gasatmosphäre abhängt.

4b). Die Grenzfläche ist flüssig-

flüssig. Für die Grenzflächenspannung zwischen zwei nicht völlig mischbaren Flüssigkeiten gilt in weitem Umfang das gleiche, was für die Oberflächenspannung gesagt wurde, vor allem lassen sich auch hier all die Meßmethoden anwenden, die dort benutzt wurden. Auch das, was über kapillaraktive und nicht kapillaraktive Stoffe gesagt wurde, bleibt bestehen. Folgende Umstände verdienen besonders berücksichtigt zu werden: da die beiden Flüssigkeiten stets in gewissem Betrage ineinander löslich sind, muß man immer die der gegenseitigen Sättigung entsprechende statische Spannung von der anfänglichen dynamischen unterscheiden. Die Werte der Grenzflächenspannung sind ferner meist kleiner als die der Oberflächenspannung. Man findet nicht bloß eine Abnahme derselben mit steigender Temperatur, sondern auch Zunahmen; letztere bei Flüssigkeitspaaren, die einen unteren kritischen Mischungspunkt haben.

Von Interesse ist die Beziehung der Oberflächenspannung zweier Flüssigkeiten zu der zwischen ihnen bestehenden Grenzflächenspannung, die besondere bei den sogenannten Ausbreitungserscheinungen eine Rolle spielt. Bringt man einen Tropfen der Flüssigkeit B auf die Flüssigkeit A, so wird sich entweder B auf A ausbreiten, oder A wird B umhüllen. Maßgebend ist die Größe der im Punkt P zusammenwirkenden Spannungen (siehe Figur 2): der Oberflächenspannung

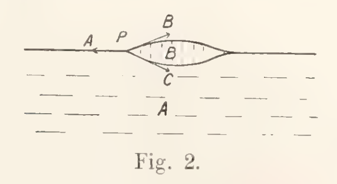


Fig. 2.

von A (PA), der von B (PB) und der Grenzflächenspannung PC. Sind die Flüssigkeiten völlig ineinander mischbar, ist also die Grenzflächenspannung gleich Null, so ergibt sich die einfache Regel, daß sich die Flüssigkeit mit der kleineren Oberflächenspannung auf der mit der größeren ausbreitet.

Sind die Flüssigkeiten nicht völlig miteinander mischbar, so bleibt B als linsenförmiger Tropfen auf A liegen und es erhebt sich die Frage, welchen Wert hat der Winkel zwischen PB und PC. Es hat sich herausgestellt, daß man diesen gleich Null setzen darf und daß man also für das Gleichgewicht die Beziehung hat

$$\sigma'_A = \sigma'_B + \sigma_{AB}$$

Hier bedeuten σ'_A und σ'_B die Oberflächenspannungen von A und B, nachdem sie sich gegenseitig gesättigt haben, σ_{AB} ist die Grenzflächenspannung. Man kann also die Grenzflächenspannung berechnen aus der Oberflächenspannung der beiden Flüssigkeiten, vorausgesetzt, daß sie gesättigt sind, nicht aber aus den Oberflächenspannungen der beiden reinen Flüssigkeiten.

4c) Die Grenzfläche ist fest-gasförmig und fest-flüssig. Einige Schwierigkeiten bietet die Frage nach der Oberflächenspannung eines festen Stoffes gegen ein Gas, bez. seiner Grenzflächenspannung gegen eine Flüssigkeit. Da die Teilchen eines festen Stoffes schwer gegeneinander beweglich sind, lassen sich die bisher erwähnten Methoden einer direkten Messung der Spannung nicht anwenden, und man hat daher bezweifelt, ob es überhaupt zweckmäßig sei bei festen Stoffen von diesen Begriffen zu sprechen. Aber mit Unrecht: abgesehen von anderen indirekten Beweisen von ihrer Existenz gibt es eine Erscheinung, die sie unbedingt fordert. Oben wurde erwähnt, daß kleinere Tröpfchen einen größeren Dampfdruck haben als große, und daß dies auf die Oberflächenspannung zurückzuführen ist. Nun findet man, daß auch kleine Kristalle eine größere Dampfspannung haben müssen wie große; denn man weiß, daß in einem evakuierten Raum kleine Kristalle im Laufe der Zeit in einige große sich vereinigen. Man kann also auch diese Erscheinung auf eine Oberflächenspannung des festen Stoffes gegen seinen Dampf zurückführen. Quantitative Messungen dieser Art liegen nicht vor.

Dem Dampfdruck im Gasraum entspricht in einer Lösung die Löslichkeit. Kleine Tröpfchen einer Flüssigkeit A sind in einer Flüssigkeit B löslicher als große, sie vereinigen sich daher in große Tropfen. Es gilt die gleiche quantitative Gesetzmäßigkeit, wie sie oben für den Dampfdruck kleiner Tropfen abgeleitet wurde. Nun zeigen auch kleinere Kristalle in einem Lösungsmittel eine größere Löslichkeit als große. Dies äußert sich einmal darin, daß sie verschwinden und zu größeren zusammentreten, dann hat man aber auch die größere Löslichkeit quantitativ bestimmen können. Die Grenzflächenspannung, die man z. B. für Gips in seiner gesättigten Lösung so berechnen konnte, betrug etwa 1000 dyn/cm.

Existiert nun bei solchen Körpern eine Oberflächenspannung und Grenzflächenspannung, so gelten für sie auch die aus der Thermodynamik ableitbaren Gesetze, die oben erwähnt wurden; vor allem also auch das Gesetz, daß, wenn die Oberflächenspannung mit steigendem Gasdruck, oder die Grenzflächenspannung mit steigender Konzentration des gelösten Stoffes abnimmt, eine Verdichtung des Gases oder Anreicherung der gelösten Stoffe an der Grenzfläche statthat. Man hat nun die sogenannte Adsorption (vgl. auch den Artikel „Adsorption“) eine

Gases bezw. gelöster Stoffe auf die Grenzflächenverdichtung zurückgeführt, und es sprechen eine Reihe gewichtige Gründe zugunsten dieser Anschauung. Ein quantitativer Beweis hat bisher nicht erbracht werden können, eben wegen der großen Schwierigkeit, die Oberflächenspannung bezw. Grenzflächenspannung fester Stoffe zu messen (vgl. den Artikel „Adsorption").

Die Ausbreitung einer Flüssigkeit auf einer zweiten entspricht der Benetzung einer festen Oberfläche durch eine Flüssigkeit. Auch hier hat man es wieder mit der Wechselwirkung dreier Spannungen zu tun, nur daß hier eben die Schwierigkeit der Messung die Einsicht in den quantitativen Zusammenhang bisher weitgehend verhindert hat.

4d) Kapillarelektrische Erscheinungen. Ueberaus mannigfaltig werden nun die Erscheinungen, wenn die elektrische Energie noch hinzutritt. Allgemeingültiges ist allerdings nur in sehr geringem Maße zutage gefördert worden, es muß deshalb Näheres über diese Gegenstände den besonderen Abschnitten, (Potential, Elektrokapillarität) überlassen bleiben. Hier soll nur kurz das Allerwesentlichste hervorgehoben werden.

Der Einfluß einer Potentialdifferenz auf die Grenzflächenspannung Quecksilber-wässerige Lösungen ist vor allem untersucht worden. Lädt man Quecksilber in den meisten Lösungen seiner Salze negativ auf, so wächst die Grenzflächenspannung, erreicht ein Maximum und nimmt bei noch größerer negativer Aufladung wieder ab. Die ursprüngliche, einfachste Theorie der Erscheinung ging dahin, daß die Grenzflächenspannung nur eine Funktion der elektrischen Ladung (bezw. des Merkuroions) sei, daß dann im Maximum der Grenzflächenspannung die Ladung Null sei, während auf dem aufsteigenden Ast der Grenzflächenspannungs-Potentialkurve die Ladung positiv, auf dem absteigenden negativ sei.

Es muß aber als sicher gelten, daß kapillaraktive Stoffe die Grenzflächenspannung beeinflussen und in noch unbekannter Weise das Maximum der Grenzflächenspannung verschieben. Immerhin ist nicht unwahrscheinlich, daß bei nichtkapillaraktiven Stoffen, wie den anorganischen Salzen, beim Maximum der Grenzflächenspannung die elektrische Ladung des Quecksilbers Null ist. Hierfür spricht z. B. der Umstand, daß kapillaraktive Anionen wesentlich nur den aufsteigenden Ast der Grenzflächenspannungs-Potentialkurve beeinflussen, kapillaraktive Kationen den absteigenden Ast.

Beim Maximum der Grenzflächenspannung hat man also den Nullpunkt des elektrischen Potentials (vgl. den Artikel „Potential").

Auf diesen Erscheinungen beruht bekanntlich auch das Kapillarelektrometer: man verändert die elektrische Ladung eines kapillaren Quecksilbermeniskus, ändert dadurch seine Grenzflächenspannung und veranlaßt so seine Bewegung; diese dient zum Anzeigen des elektrischen Stromes.

Aehnliche Versuche mit geschmolzenen Legierungen und Salzen, ferner Messungen des Potentials von Quecksilber, das in wässerige Lösungen hineintropft, haben nicht wesentlich zur Klärung dieser Erscheinungen beigetragen.

An der Grenzfläche fest-flüssig fallen besonders die sogenannten elektrokinetischen Vorgänge als solche ins Auge, bei denen wahrscheinlich die Adsorption und damit die Grenzflächenspannung eine bedeutsame Rolle spielt.

Sie gehören zu den reibungselektrischen Erscheinungen, und zwar handelt es sich entweder darum, daß durch Bewegung einer Flüssigkeit gegen eine feste Wand (oder umgekehrt) elektrische Potentiale erzeugt werden, oder daß durch Anlegen einer Potentialdifferenz Flüssigkeit gegen eine feste Wand (oder umgekehrt) bewegt wird. Das folgende Schema gibt einen Ueberblick über die wichtigsten Vorgänge dieser Art:

A. Eine von außen angelegte elektromotorische Kraft erzeugt eine Bewegung:
  I. der Flüssigkeit gegen eine feste Grenzfläche: Elektroendosmose;
  II. fester Teilchen gegen eine Flüssigkeit: Kataphorese.

B. Eine von außen hervorgerufene Bewegung erzeugt eine elektromotorische Kraft:
  I. die Flüssigkeit wird gegen die feste Grenzfläche bewegt: Strömungsströme;
  II. der feste Körper wird gegen die Flüssigkeit bewegt: Erschütterungsströme, Ströme durch fallende Teilchen u. a. m. (s. auch den Artikel „Elektroosmose").

Da der Zusammenhang mit der Mechanochemie einigermaßen mittelbar ist und die Verhältnisse noch nicht soweit geklärt sind, daß sie sich kurz und einfach darstellen lassen, muß auf die Sonderartikel verwiesen werden.

Ein gleiches gilt für die kapillarelektrischen Erscheinungen an den Grenzflächen flüssig-gasförmig und fest-gasförmig. Manche von ihnen werden sicher, wenn besser bekannt, von großer Wichtigkeit werden, so z. B. die sogenannte Wasserfallelektrizität — das Auftreten von elektrischen Ladungen beim Auftreffen eines Flüssigkeitsstrahls auf einer Flüssigkeitsoberfläche — sowie der Einfluß von Potentialdifferenzen auf die Vereinigung von Tropfen und Strahlen.

4e) Die Kolloidchemie als angewandte Kapillarchemie. Angewandte Kapillarchemie bezw. Mechanochemie in weitem Maße ist nun die Kolloidchemie; immer spielen hier die Grenzflächenspannung, die Adsorption, die kapillarelektrischen Erscheinungen eine entscheidende Rolle. Dies Gebiet ist natürlich zu ausgedehnt und mannigfaltig, um hier besprochen zu werden (das Nähere siehe im Artikel „Disperse Systeme).

5. Einfluß der Schwerkraft und Zentrifugalkraft auf chemische Systeme. Es Es bleiben nun noch die Erscheinungen zu besprechen, die die Schwerkraft und Zentrifugalkraft in chemischen Systemen hervorrufen. In beiden Fällen handelt es sich darum, daß man das System in ein Kraftfeld hineinbringt, welches auf die verschieden dichten Komponenten desselben ihrer Masse gemäß verschieden stark einwirkt und so Verschiebungen des Gleichgewichts bedingt. Schwerkraft und Zentrifugalkraft lassen sich als ganz gleichartig betrachten, man kann in den mathematischen Ueberlegungen einfach für das Gewicht die Zentrifugalkraft einsetzen; nur hat man es bei der Schwere mit einer gegebenen Beschleunigung zu tun — die bloß von einem Punkt der Erdoberfläche zum anderen wechselt — während man bei der Zentrifugalkraft einen beträchtlichen Bereich von Kraftwirkungen je nach der Umdrehungsgeschwindigkeit beherrscht.

Der einfachste Fall ist das Gleichgewicht eines chemisch einheitlichen Gases unter dem Einfluß der Schwere. Eine aus dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre folgende Betrachtung führt zu der sogenannten hypsometrischen Formel

$$\ln \frac{p_0}{p} = \frac{\varrho_0}{p_0} h = \frac{M}{RT} h$$

Hier sind p_0 und p der Gasdruck im Abstand o und h von der Erdoberfläche, ϱ_0 ist die Gasdichte an der Erdoberfläche. M ist das Molekulargewicht, R und T haben die bekannte Bedeutung. Gasdruck und Gasdichte nehmen also mit der Höhe ab und zwar nach einer exponentiellen Abhängigkeit. Nach dieser Formel kann man mit Hilfe des Barometers die Höhe bestimmen.

Hat man ein Gemisch von verschieden schweren Gasen, so gilt für den Partialdruck von jedem eine solche Gleichung und durch Subtraktion der einen von der anderen erhält man

$$\ln \frac{p'}{p} - \ln \frac{p'_0}{p_0} = \frac{h}{RT}(M - M')$$

d. h. es sammelt sich das Gas mit dem größeren Molekulargewicht an der Erdoberfläche. Diese Gleichung ist grundlegend für die Beurteilung der Atmosphäre der Weltkörper. Je tiefer man von einem Weltkörper aus in den Weltenraum hineingelangt, aus um so leichteren Gasen besteht die Atmosphäre. Bei der Sonne hat sich feststellen lassen, daß eine äußere Atmosphärenhülle aus Wasserstoff besteht; eine noch weiter nach außen liegende Hülle scheint ein noch leichteres Gas (Coronium) zu enthalten. Der geringe Unterschied im Molekulargewicht von Sauerstoff und Stickstoff bedingt, daß bei der Erde die Atmosphäre bis zu beträchtlichen Höhen gleich zusammengesetzt ist; in noch größeren Höhen scheint auch hier eine Wasserstoff- und vielleicht eine Coroniumatmosphäre zu folgen (Wegener).

Analoges gilt für den Einfluß der Zentrifugalkraft auf Gasgleichgewichte. Für ein chemisch homogenes Gas findet man die Gleichung

$$\ln \frac{p_1}{p_2} = \frac{2\pi^2 \nu^2}{RT} M(r_1^2 - r_2^2).$$

Hier sind p_1 und p_2 die Drucke im Abstand r_1 und r_2 von der Rotationsachse, π ist der halbe Umfang des Einheitskreises, ν die Tourenzahl in der Sekunde, M, R, T haben dieselbe Bedeutung wie oben. Das Gas hat am achsenfernsten Punkt den größten Druck. Eine Messung dieser Effekte ist wegen des raschen Druckausgleiches, der nach dem Aufhören der Rotation statthat, kaum möglich.

Dagegen erfolgt er bei einem Gasgemisch durch Diffusion und demgemäß verhältnismäßig langsam. Bei der Rotation eines Gemisches von Wasserstoff und Jodwasserstoff konnte Bredig in der Tat nachweisen, daß auch eine Konzentrationsverschiebung auftritt derart, daß das innere Ende der Versuchsrohrs wasserstoffreicher ist als das äußere; das schwerere Jodwasserstoffgas ist ausgeschleudert worden. Die quantitative Größe der Effekte entsprach gleichfalls der Theorie. Die hier in Betracht kommende Gleichung

$$\ln \frac{p_{H_2}}{p_{HJ}} - \ln \frac{p'_{H_2}}{p'_{HJ}} = \frac{2\pi^2 \nu^2}{RT}(r_1^2 - r_2^2)(M_{H_2} - M_{HJ})$$

mußte der speziellen Versuchsbedingungen wegen etwas umgestaltet werden.

Was für Gase gilt, gilt in analoger Weise für Lösungen. Man muß nur in der oben erwähnten hypsometrischen Formel statt des gewöhnlichen Druckes den osmotischen setzen und den Auftrieb beruksichtigen. Eine Ueberschlagsrechnung zeigt, daß der Effekt sehr klein ist, erst in Höhen von 50 und mehr Metern kommt der Konzentrationsunterschied in die Größenordnung von Prozenten. Da der Konzentrationsunterschied sich durch Diffusion einstellt, so braucht er zu seiner Ausbildung, wie Des Coudres gezeigt hat,

beträchtliche Zeit. Quantitativ ist er noch nicht bestimmt worden.

Dagegen haben The Earl of Berkeley und Burton den analogen Effekt beim Zentrifugieren einer wässerigen Cäsiumchloridlösung mit der Theorie in Uebereinstimmung gefunden. In Widerspruch dazu stehen Versuche von van Calcar und Lobry de Bruyn, die viel zu große Effekte z. B. bei Rohrzuckerlösungen fanden, ohne daß man bisher eine Erklärung dafür hätte geben können.

Eine überraschende Anwendung der hypsometrischen Formel auf sogenannte disperse Systeme hat Perrin gemacht. Disperse Systeme sind, wie oben erwähnt, solche, bei denen kleine mikroskopische oder ultramikroskopische Teilchen gleichmäßig in einem anderen Medium, meist in einer Flüssigkeit verteilt sind. Diese Teilchen zeigen nun, wenn hinreichend klein, eine charakteristische, durch äußere Umstände wie Licht, Stöße usw. nicht beeinflußbare wimmelnde Bewegung, die Brownsche Molekularbewegung (siehe auch den Artikel „Disperse Systeme") genannt wird; eben wegen ihrer Unbeeinflußbarkeit hat man angenommen, daß sie von den nach der kinetischen Theorie zu erwartenden Stößen der Flüssigkeitsmoleküle hervorgerufen wird. Die theoretische Diskussion ergibt nun, daß ein derartig gestoßenes Teilchen ganz ähnliche Bewegungen ausführen muß wie sie nach der kinetischen Theorie der Gase bezw. gelösten Stoffe ein Gasmolekül bezw. Molekül eines gelösten Stoffes ausführt. Ist dem so, so muß auch die unter dem Einfluß der Schwerkraft von der Höhe abhängige Konzentrationsänderung existieren. Diese war nun im oben erörterten Fall einer Lösung erst in großer Höhe merkbar. Hier im dispersen System hat man es aber mit mikroskopisch sichtbaren Teilchen zu tun, d. h. faßt man sie als Moleküle auf, mit Molekülen von ungeheuer großem Molekulargewicht. Da, wie aus der oben erwähnten Formel hervorgeht, die Höhe, in der die Konzentrationsänderung merkbar wird, sehr stark mit dem Molekulargewicht abnimmt, so ergibt sich, daß man für eine mikroskopische Suspension schon innerhalb eines Millimeters die Schwereverteilung muß nachweisen können. Während man also sonst den Gasdruck bezw. osmotischen Druck bestimmt und daraus nach der kinetischen Theorie auf die Zahl der Teilchen in der Volumeinheit usw. schließt, mißt man hier unmittelbar mikroskopisch die Zahl der Teilchen in der Volumeinheit und prüft, ob für die durch die Brownsche Bewegung hervorgerufenen Stöße ein Druck herauskommt, der dem osmotischen entspricht. Uebertragt man die oben angeführte hypsometrische Formel auf den Fall einer Lösung in Wasser und übersetzt sie in Ausdrücke der kinetischen Theorie, so erhält man

$$\ln\frac{n_0}{n} = \frac{v.h.g(\varrho-1)}{k}$$

Hier sind n_0 und n die in den Höhen o und h in der Volumeinheit vorhandenen Teilchen, v ist das Volum eines einzelnen Teilchen, ϱ seine Dichte, g die Beschleunigung durch die Erdschwere, k der „osmotische" Druck, der ausgeübt wird, wenn ein einziges Teilchen in der Volumeinheit vorhanden wäre.

Perrin konnte nun unter geeigneten Vorsichtsmaßregeln für mikroskopische Suspensionen von Mastix und Gummigutt in Wasser die Größen n_0, n, h, v und ϱ direkt bestimmen, k ergab sich also aus der Formel. Gehorchte nun k den van't Hoffschen Gesetzen des osmotischen Druckes, so mußte es nach der kinetischen Theorie die Gleichung erfüllen

$$k = \frac{RT}{N},$$

wo R und T die bekannte Bedeutung haben, und N die sogenannte Loschmidtsche Zahl ist, d. h. die Zahl der Moleküle in einem Grammmolekül. Nahm man für N einen Wert von etwa 6.10^{23} wie er aus elektrischen und radioaktiven Versuchen gewonnen wird, so ergab sich R tatsächlich richtig zu etwa 2 g-cal. Umgekehrt kann man durch Einsetzen von R einen zutreffenden Wert von N erhalten.

Aus diesen grundlegenden Versuchen folgt also: die Brownsche Bewegung gehorcht quantitativ dem, was aus der kinetischen Theorie zu erwarten wäre. Da man stetig von einer groben Suspension zu einer wahren Lösung übergehen kann, so ist dargetan, daß auch dort, wo man die Teilchen und ihre Brownsche Bewegung nicht sehen kann, die kinetische Theorie mehr als bloße Wahrscheinlichkeit ist.

Der Einfluß der Schwerkraft bezw. Zentrifugalkraft auf homogene chemische Gleichgewichte ist von Bredig erörtert worden. Es ergibt sich, daß die Gleichgewichtskonstante nicht verändert wird, wohl aber ändert sich die Dichte des Gesamtsystems mit zunehmender Höhe bezw. Zunahme des Rotationsradius; es können sich deshalb auch die Mengenverhältnisse der Komponenten ändern. Messende Versuche scheinen nicht vorzuliegen.

Bemerkenswerte Folgerungen kann man auch für die Schwerkraft und vor allem für die Zentrifugalkraft — deren Wirkung man ja beträchtlich über die der Schwerkraft hinaus steigern kann — auf das Gleichgewicht in heterogenen Systemen ziehen. So muß z. B. in einer gesättigten Lösung beim Zentrifugieren ein in die Achse gebrachter Kristall sich auflösen, ein in der Peripherie befindlicher sich vergrößern. In der Tat geben

van Calcar und Lobry de Bruyn an, ein Auskristallisieren aus einer gesättigten Glaubersalzlösung beim Zentrifugieren erzielt zu haben, aber der Effekt ist wiederum, wie in ihren oben erwähnten Versuchen, viel zu groß.

Die Einwirkung der Schwerkraft bezw. Zentrifugalkraft auf die elektromotorische Kraft ist mehrfach Gegenstand der Untersuchung gewesen. Die Verhältnisse liegen ziemlich verwickelt. Der oben erwähnte Umstand, daß die Konzentration einer Lösung mit der Höhe h bzw. dem Rotationsradius sich ändert, bedingt natürlich das Entstehen einer Konzentrationskette, falls man in verschiedenen Höhen bezw. verschiedenem Abstand von der Rotationsachse Elektroden anbringt. Da sich diese Konzentrationsunterschiede, wie oben gleichfalls betont wurde, ziemlich langsam ausbilden, so muß auch die elektromotorische Kraft erst allmählich zutage treten.

Nun entsteht aber sofort eine Potentialdifferenz, wenn man etwa einen Höhenunterschied zwischen zwei Elektroden erzeugt oder eine Lösung mit zwei Elektroden in verschiedenem Abstand von der Rotationsachse zentrifugiert. Dies rührt daher, daß, wie sonst auch, die Ionen eines Salzes als selbständige Stoffe zu betrachten sind und daß, wie oben im Fall des Gemisches zweier Gase, das schwerere Ion in der Nähe der Erdoberfläche bezw. an der Peripherie des Rotationskreises sich anzureichern bestrebt ist. Eine Trennung beider Ionen in reichlicher Menge ist nicht möglich, wohl aber entsteht, wie im Fall der Ausbildung eines sogenannten Diffusionspotentialsprungs, sofort eine elektromotorische Kraft.

Durch ähnliche Ueberlegungen, wie im eben erwähnten Falle, erhält man für den Einfluß der Schwere die Gleichung

$$\varepsilon = \frac{hg}{F}\{nM_S(1-v_S\varrho)-M_A(1-v_A\varrho)\}$$

für den Einfluß der Zentrifugalkraft die Gleichung

$$\varepsilon = \frac{2\pi^2\nu^2(r_2^2-r_1^2)}{F}\{nM_S(1-v_S\varrho)-M_A(1-v_A\varrho)\}$$

Hier ist ε die elektromotorische Kraft, h die Höhe, g die Beschleunigung durch die Schwere, F 96540 Coulombs, n die Ueberführungszahl des Kations, M_S und M_A das Molekulargewicht des Elektrolyten bezw., das Aequivalentgewicht des Anions, v_S und v_A sind die sogenannten partiellen spezifischen Volume, d. h. Volumänderungen pro Gramm gelöste Substanz, bei so großem Volumen, daß durch das Auflösen keine Konzentrationsänderung mehr erfolgt; v_S bezieht sich auf das Salz, v_A auf das abgeschiedene Anion (im Fall von Jodiden z. B. auf J_2); ϱ ist die Dichte der Lösung.

Man kann aus diesen Gleichungen, wie man sieht, durch Messen der Potentialdifferenz die Ueberführungszahl n berechnen. Tatsächlich fand Des Coudres für Gravitationsketten, Tolman für Zentrifugalketten gute Uebereinstimmung mit dem direkt gemessenen Wert von n.

Uebrigens ist noch zu beachten, daß im schließlichen Gleichgewicht keine Potentialdifferenz zwischen verschieden hohen Elektroden bezw. solchen, die verschiedenen Abstand von der Rotationsachse haben, existieren darf. Im ersten Fall könnte man ja sonst im Widerspruch mit dem zweiten Hauptsatz aus einem im Gleichgewicht befindlichen System dauernd Arbeit gewinnen; im letzteren Falle würde ohne elektromagnetische Mitwirkung durch Rotation elektrische Energie entstehen, wovon man kein Beispiel kennt. Es muß also die miterwähnte sich allmählich einstellende, auf den Konzentrationsunterschieden beruhende Potentialdifferenz der auf der gegenseitigen Verschiebung der Ionen beruhenden schließlich die Wage halten.

Literatur. *Eine zusammenfassende Darstellung der Mechanochemie existiert noch nicht. Einige Abschnitte derselben finden sich in Büchern und Abhandlungen behandelt. Es seien die wichtigsten genannt:* **van der Waals.** *Die Kontinuität des gasförmigen und flüssigen Zustandes. Leipzig 1895.* — **G. Tammann,** *Ueber die Beziehungen zwischen den inneren Kräften und Eigenschaften der Lösungen. Hamburg und Leipzig 1907.* — **H. Freundlich,** *Kapillarchemie. Leipzig 1909.* — **Röntgen** *und seine Mitarbeiter in Wied. Ann.* **22,** *510 (1884);* **29,** *165 (1886);* **31,** *1000 (1887);* **33,** *644 (1888);* **34,** *531 (1888);* **44,** *1 u. 48 (1891);* **45,** *98, 560 u. 666 (1892);* **52,** *593 (1894); Drud. Ann.* **27,** *311 (1908).* — **G. Tammann** *und seine Mitarbeiter in Zeitschr. f. phys. Ann.* **11,** *676 (1893);* **13,** *174 u. 543 (1894);* **14,** *163 u. 433 (1894);* **16,** *91, 139, 659 (1895);* **17,** *620, 725 (1895);* **18,** *625, (1895);* **27,** *457 (1898);* **46,** *818 (1904);* **63,** *141 (1908);* **67,** *212 (1909);* **68,** *281 (1909);* **69,** *569 (1909);* **71,** *511 (1910);* **75,** *108 u. 305 (1911); Wied. Ann.* **69,** *767 (1899); Drud. Ann.* **10,** *647 (1903); Zeitschr. f. Elektrochem.* **15,** *447 (1909);* **16,** *592 (1910).* — **Des-coudres,** *in Wied. Ann.* **46,** *292 (1892);* **49,** *284 (1893);* **55,** *213 (1895);* **57,** *232 (1896).* — **Th. W. Richards** *und seine Mitarbeiter in Zeitschr. f. phys. Chem.* **61,** *71, 100, 171, 449 (1908);* **71,** *152 (1910).* — **E. Cohen** *und seine Mitarbeiter in Zeitschr. f. phys. Chem.* **67,** *1, 432, 513 (1909):* **69,** *102 (1909);* **75,** *1, 219, 257 (1911).* — **G. Bredig,** *in Zeitschr. f. phys. Chem.* **17,** *459 (1895).* — **Lafay,** *in Ann. d. chim. et de phys. (8)* **19,** *289 (1910).*

H. Freundlich.

Meckel
Johann Friedrich.

Geboren am 17. Oktober 1781 in Halle; gestorben am 31. Oktober 1833 daselbst. Er entstammte einer Anatomenfamilie, sein Vater und Großvater wirkten vor ihm in Halle als solche. Nach mehrfachen Reisen 1805/06 nach Paris, Italien, Holland und England kehrte er nach Halle zurück und wurde hier mit 25 Jahren Professor der Anatomie. Dort gab er auch das bekannte Archiv für Anatomie und Physiologie heraus. In den unter seiner Leitung herausgekommenen 14 Bänden sind wertvolle Abhandlungen von ihm selbst, sowie von ersten deutschen Anatomen und Zootomen enthalten. So wurde Halle eine Zentrale für vergleichende Anatomie, wie es Paris Anfangs des 19. Jahrhunderts unter Cuvier war. Von seinen Arbeiten sind wertvoll seine Abhandlung über das Schnabeltier: Ornithorynchi paradoxi descriptio, sowie das Handbuch der menschlichen Anatomie (4 Bände, Halle 1815 bis 1820) desgleichen sein Handbuch der pathologischen Anatomie (3 Bände, Leipzig 1812 bis 1818). In diesem sind namentlich einige selbständige grundlegende Forschungen über die Mißbildungen enthalten, die er damit in den Kreis der Morphologie zog. Die größten Erfolge errang Meckel jedoch auf dem Gebiete der Zootomie, von dem sein System der vergleichenden Anatomie Zeugnis ablegt (6 Bände Halle 1821 bis 1833). Es enthält eine Fülle von Tatsachen und Forschungsresultaten, die erst in späterer Zeit voll gewürdigt worden sind. In diesen Werken gibt er schon die Richtlinien für die moderne vergleichende Anatomie in großen Zügen an und begründet den Satz, daß die Entwicklung des einzelnen Organismus nach denselben Gesetzen geschieht wie in der ganzen Tierreihe, d. h. das höhere Tier durchläuft in seiner Entwicklung im wesentlichen die unter ihm stehenden Stufen, wodurch die periodischen, wie die Klassenverschiedenheiten aufeinander zurückgeführt werden. Wir haben hier also schon, in wesentlichen Zügen, das biogenetische Grundgesetz Haeckels. Von sonstigen Werken seien genannt: Die Uebersetzung von Cuviers Vergleichender Anatomie 4 Bde., Leipzig 1809/10; Beiträge zur vergleichenden Anatomie, 2 Bde., Leipzig 1809 bis 1813; Tabulae anatomico-pathologicae, 4 Hefte, Leipzig 1817 bis 1826.

Literatur. *Allgem. Deutsche Biographie.* — ***J. V. Carus,*** *Geschichte d. Zoologie, München 1872.* — ***R. Burckhardt,*** *Geschichte der Zoologie, Leipzig 1907.*

W. Harms.

Meer.

1. Größe und Volum der Meeresbecken. 2. Die Bodenformen. 3. Die Bodensedimente: a) die litoralen Ablagerungen. b) die hemipelagischen Sedimente. c) Die Tiefseebildungen. 4. Das Meerwasser: a) der Salzgehalt. b) die allgemeinen physikalischen Eigenschaften. c) der Gasgehalt. d) die Temperaturverhältnisse. e) die Eisbildungen. 5. Die Meereswellen: a) die Windwellen. b) die Dislokations- und Explosionswogen. c) die stehenden Wellen. d) Interne Wellen. e) die Brandung, Abrasion, Strandvertriftung. 6. Die Gezeitenströme. 7. Die Meeresströmungen: a) die Anordnung. b) Theorie: α) die Erdrotation. β) die Kontinuitätsbedingung. γ) die Reibung; δ) Dichteunterschiede. ε) Luftdruck- und Windwirkung. c) Erosionswirkung.

1. Größe und Volum der Meeresbecken. Die irdische Meeresdecke ist ein zusammenhängendes Ganzes und ihre Oberfläche hat sich überall senkrecht zur Richtung der örtlichen Schwerkraft eingestellt, ist also eine sogenannte Niveaufläche. Wasseransammlungen, die mit dem Meer nicht in gleichem Niveau zusammenhängen, werden nicht zum Meer gerechnet, sondern sind Binnengewässer des Landes; sie liegen zumeist über dem Meeresspiegel, aber auch in einigen Fällen unter demselben (Kaspisches Meer — 26 m, Totes Meer — 394 m). Seine Form erhält der Ozean durch die Unebenheiten der Erdkruste, in die er eingebettet ist. Da die Umrisse des über das Meeresniveau hinausragenden Landes nicht überall, namentlich in den Polarregionen beider Hemisphären nicht, genau bekannt und vermessen sind, vermögen wir auch eine genaue Angabe über das Gesamtareal der irdischen Meeresdecke nicht zu machen; indem man die Ergebnisse der modernen Forschungsreisen heranzieht, darf man annehmen, daß der weitaus überwiegende Teil des unerforschten Südpolarraums dem Lande, des Nordpolargebiets dem Meere zuzurechnen ist. So gelangt man zurzeit zu einem wahrscheinlichsten Wert für das Areal des Ozeans von 361,1 Millionen qkm, so daß auf die Landflächen 148,8 Mill. entfallen, was einem Flächenverhältnis von 2,43 zu 1 oder 70,8 zu 29,2 % entspräche. Indem die Wasserfläche also rund 2½ mal größer ist als die des Landes, beherrscht sie das Antlitz der Erde und macht es überwiegend ozeanisch.

Die Wasserfläche wird durch das daraus hervorragende Land in der unregelmäßigsten Weise gegliedert. Während in den hohen Südbreiten voller Zusammenhang rings um die Erde besteht, ragen zwischen die großen meridional angeordneten Landmassen der tropischen und hohen Nordbreiten drei größere Ozeane hinein, der Atlantische zwischen Amerika und Europa-Afrika, der Indische zwischen Afrika und Australien, der Stille oder Pazifische zwischen Asien-Australien und Amerika. Auf diese Weise erhält die Nordhalbkugel erheblich weniger Wasser (60,8%), die südliche mehr (80,9%), als dem mittleren Verhältnis entspräche; ebenso ist auch die im Westen des Meridians von 20° W. L. (Grw.) gelegene Halbkugel wasserreicher (81,2%) als die östlich davon gelegene (mit nur 62,1%). Es ist eine Erdansicht möglich, indem man den Blick auf eine

Stelle südwestlich von Neuseeland ($47^1/_4{}^0$ S. B., $177\frac{1}{2}^0$ O. L.) richtet, wo man ein Maximum von Wasserfläche übersieht: die so definierte Wasserhalbkugel hat dann 230,6 Mill. qkm (90,5%) Wasser und nur 24,4 Mill. Land, während die gegenüberliegende Landhalbkugel mit ihrem Pol unweit der Loiremündung bei Croisic ($47^1/_4{}^0$ N. B., $2\frac{1}{2}^0$ W. L.) noch immer etwas weniger Land als Wasser enthält (Verhältnis 47,3 zu 52,7%); also auch diese sogenannte Landhalbkugel ist noch überwiegend ozeanisch.

Der Ozean erfüllt die großen Eintiefungen der Erdkruste. Nach den in den letzten 50 Jahren ausgeführten Tiefseelotungen hat sich gezeigt, daß die eigentlich ozeanischen Räume im Mittel fast 4 km tief sind und daß die in die Landflächen sich einschiebenden Nebenmeere diesen Wert nur um etwas über 300 m erniedrigen, so daß die Mitteltiefe der gesamten irdischen Meeresdecke auf 3700 m (rechnungsmäßig 3681 m) anzunehmen ist. Hiernach ergibt sich als Rauminhalt des Weltmeeres der gewaltige Wert von 1330 Mill. cbkm. Dieser Raum übertrifft das Volum der über den Meeresspiegel hervorragenden Landflächen 12,8 mal, wobei als mittlere Höhe derselben 700 m angenommen werden. Könnte man sich das Meer verdunstet denken, so würden die Kontinente nach A. v. Humboldts Ausdruck wie gewaltige Hochebenen über der Sohle der Ozeane aufsteigen mit einem Sockel, der der mittleren Meerestiefe gleich ist, also 3680 + 700 = 4380 m. Der so aufgefaßte Landblock mit 651,8 Mill. cbkm ist noch nicht halb so groß wie der Wasserblock. Wollten wir nun noch diesen Landblock auf dem Meeresboden soweit ausbreiten, daß eine zusammenhängende Wasserhülle von überall gleicher Tiefe die ganze Erdoberfläche gleichmäßig überdeckte, so würde dieses „mittlere Krustenniveau" 2400 m unter dem jetzigen Meeresspiegel liegen. H. R. Mill hat die unterhalb dieser 2400 m Tiefe gelegenen Meeresräume als die abyssischen bezeichnet und Penck darauf hingewiesen, daß von dieser Niveaulinie alle Inseln mit Ausnahme der rein ozeanischen an die Festlandsockel angeschlossen werden. Diesen abyssischen Räumen kommt ein Areal von 287 Mill. qkm zu, das sind fast 80 % des gesamten Weltmeers. In diesem sind noch über 4000 m tief 185 Mill. qkm oder 50,7 %, d. h. 24 Mill. qkm mehr als die gesamten Landflächen betragen; über 5000 m 72 Mill. qkm (wie Asien plus Afrika) oder 20 %, über 6000 m noch 5 Mill. qkm (= halb Europa) oder 1,5 % der Meeresfläche.

2. Die Bodenformen. Da der Meeresboden den abtragenden Eingriffen der Verwitterung und des spülenden Wassers entzogen ist und sein Relief nur im Widerstreit zwischen Faltungen, Verbiegungen und Verwerfungen einerseits und Sedimentauffüllung oder Vulkanausbrüchen andererseits ausbilden kann, wird der Formenkreis der unterseeischen Bodenreliefs eintöniger sein als der des trockenen Landes. Dem landfernen Ozean kommt nach den Untersuchungen der modernen Kabeltechniker daher ein im allgemeinen großzügiges Relief zu, gekennzeichnet durch ganz sanftwellige, bisweilen fast ebene Strecken; und nur wo Vulkanausbrüche den Boden mit Lavamassen überdeckt haben, oder in der Nähe der Kontinentalabstürze tiefgreifende Dislokationen aufgetreten sind, werden steile Böschungen häufiger.

Im Nordpazifischen Ozean hat der amerikanische Dampfer „Nero" für die Kabellinie zwischen den Hawaiischen Inseln und den Philippinen ein Band von 50 bis 60 km Breite genauer ausgelotet. In dem Stück westwärts von den Midway Inseln zwischen 174° und 178° O. L. finden sich auf 1500 km Länge 100 Lotungen, wovon die größte (6277 m) die kleinste (5510 m) nur um 767 übertrifft; auf einem 180 km langen Teilstück zwischen 173° und 175° O. L. bei 25,0° bis 25,4° N. B. ist die mittlere Tiefe von 14 Lotungen 5938 m mit Abweichungen von +36 und —38 m. In anderen Fällen fand der Dampfer Bodenwellen und -Kuppen, die sich aus der fast ebenen Umgebung von 5500 m stellenweise recht steil bis 2000 oder auch wohl 1400 m an die Oberfläche erhoben; so u. a. zu beiden Seiten von 163° O. L. zwischen 21° und 22° N. B. fünf solcher Aufwulstungen in Abständen von 20 bis 50 km, deren westlichste auf 7400 horizontalen Abstand von 1941 auf 4697 m also mit 20° Böschung abfällt, wenn die Ortsbestimmungen als genau richtig angenommen werden. Diese ganze unterseeische Berglandschaft ist, wie die Lotproben ergaben, von Globigerinenschlamm überdeckt, trägt aber vermutlich ein vulkanisches Grundgerüst, wie das bei ähnlichen Bildungen im Nordatlantischen Ozean und südwestlichen Teil des Pazifischen unzweifelhaft erwiesen ist. Es würde aber eine Uebertreibung bedeuten, sich den ganzen Tiefseeboden überall in dieser Weise gebirgig gestaltet zu denken. — An den Rändern der Kontinentalsockel gegen die Tiefsee hin sind steile, oft alpine Gipfelformen nachahmende Gehänge häufig bekannt geworden; so am Abfall des Biskayaschelfs, an der Westküste der iberischen Halbinsel, und sonst. Besonders steile Böschungen finden sich an den unterseeischen Sockeln der meisten Koralleninseln und vieler Bruchinseln der Mittelmeere.

Unter den Großformen des ozeanischen Bodenreliefs werden folgende unterschieden: rundlich gestaltete Becken, länglichere Mulden, die durch sanft ansteigende Schwellen oder Rücken und Plateaus getrennt werden. Näher den großen Bruchlinien der Erdkruste sinkt der Meeresboden in den sogenannten Gräben zu seinen größten Tiefen ab. Den Uebergang

von den Kontinentalsockeln zur Strandlinie hin beherrschen die sogenannten Schelfe, die mehr oder weniger breit entfaltet von seichterem Wasser bedeckt sind und meist bei 200 m, seltener 400 m Tiefe steil zur Tiefsee abfallen. Kleinräumige Unebenheiten erheben sich als Kuppen, Bänke oder Riffe über den Boden, oder senken sich als Kessel, Rinnen oder Furchen in diesen ein. Diese Kleinformen kommen nur bei sehr sorgfältiger Auslotung zum Vorschein; sie sind ein Beweis für Dislokationen auch am Boden der eigentlichen Tiefsee; wenn sie sich auf den Schelfflächen befinden, können sie auch als untergetauchte Bestandteile des Festlandreliefs gelten.

Die Schelfe umziehen als eine gesimsartige Umrandung von wechselnder Breite die Kontinente und setzen sich oft als Tiefebenen landwärts fort. Zurzeit ist das Areal der Schelfflächen zwischen 0 und 200 m Tiefe etwa 33 Mill. qkm, denen auf dem Lande Tiefebenen von weniger als 200 m Erhebung mit etwas über 50 Mill. qkm gegenüberstehen. Viele dieser Tiefländer tragen unter einer dünnen Decke von Fluß- oder Binnenseeablagerungen oder auch glazialem Schutt die Sedimente einer rezenten oder tertiären Meeresüberflutung. Diese Schelf- und Tieflandschaften erscheinen somit als diejenigen Gebiete, in welchen sich infolge von Krustenbewegungen der Austausch zwischen Land und Meer vorzugsweise vollzieht. Schelfe sind daher wohl nirgends durch Aufschüttung allein aufgebaut, wenn auch glaziale Geschiebe an der Ausgestaltung der Neufundlandbank wie des großen antarktischen Schelfs einen gewissen Anteil haben. Ebensowenig können die Schelfe lediglich durch Abrasion beim heutigen Niveaustande des Meeres aus dem Festlandsockel herausgearbeitet sein, da in vielen Fällen ablandige Winde über die Schelfe hinwegwehen, z. B. über den breiten Patagoniaschelf, und die abtragende Wirkung der Brandungswogen überhaupt nicht in so großen Tiefen (über 50 m) mehr in Betracht kommt; man hat es hier im wesentlichen mit abgesunkenen Tieflandflächen, also mit Senkungen der Erdkruste zu tun. Die submarin erhaltenen ertrunkenen Flußtäler (die Hudson-, Kongo-, Indus-, Gangesfurche geben treffliche Beispiele) erweisen den Zusammenhang mit den benachbarten Tieflandflächen; andererseits aber lassen auch auf dem Nordseeboden die eigenartigen langgestreckten Bänke der Hoofden, wie die Außengründe vor dem Englischen Kanal erkennen, wie bei dem Absinken in die Tiefe die Wellen und die Gezeitenströme zwar abtragend und umlagernd eingreifen, aber die alten Landformen nicht ganz verwischen können. Nur wenigen Küstenstrecken fehlen vorgelagerte Schelfe ganz (Westküste Südamerikas, Südküste Arabiens). Bemerkenswert ist die Seltenheit jungvulkanischer Ausbrüche auf ihren Flächen; die Eruptionsstellen liegen zumeist erst am äußeren Abfall gegen die Tiefsee hin, wofür die vulkanischen Inselkränze vor den ostasiatischen Randmeeren typische Beispiele liefern (Aleuten, Kurilen, Riukiu-Inseln).

Die Großformen der eigentlichen Tiefsee gliedern die Ozeanbecken in Gebilde von solcher Großzügigkeit, wie sie den Festlandflächen fremd sind. Die atlantische Schwelle, die sich von Island über die Azoren äquatorwärts mitten durch den Nordatlantischen Ozean und noch weiter südwärts über Aszension bis Tristan da Cunha hin erstreckt und als wichtigste submarine Wasserscheide für die höheren Bodentemperaturen der ostatlantischen Mulde gegenüber der westatlantischen maßgebend ist, erreicht rund 14000 km Länge; und die östliche der beiden Mulden erfüllt ein Areal von 24, die westliche von 30 Mill. qkm; im Pazifischen Ozean aber ist ein ungeheures Becken von über 4000 m Tiefe vorhanden, das das nordpazifische Gebiet umfassend östlich von Neuseeland auch in südliche Breiten übergreift und mehr als 80 Mill. qkm (mit Raum für zwei Asien) erfüllt; die Hälfte davon hat mehr als 5000 m Tiefe, und der Boden dieses gewaltigen Beckens brauchte sich noch nicht um 100 m zu erheben, um die gesamten Tieflandflächen des Landes für das Meer zu erobern.

Schon bei den ersten modernen Tiefseeexpeditionen erkannte man, daß die ganz großen, 7000 oder 8000 m überragenden Tiefen nicht mitten in den landfernsten Teilen der Ozeane liegen, sondern nahe den Rändern, sei es an steilen Bruchlinien der Kontinentalsockel (so die Tuscaroratiefe bei den Kurilen) oder den Inselkränzen (Virginentiefe nördlich von Portorico, Marianentiefe südlich von Guam). Durch die Kabellotungen konnte man genauer feststellen, daß es sich hier um ziemlich schmale Austiefungen handelte, die an der Landseite steil, gegen die benachbarte Tiefsee aber sanft bis 5000 und 4000 anstiegen, und für welche Alex. Supan die Bezeichnung der Gräben einführte. Diesen Gebilden gehören fast alle Meerestiefen von mehr als 6000 m an, vor allem die größten, wie u. a. der Marianengraben mit 9636 in 12° 43.3′ N. B. 145° 49′ O. L., der Kermadecgraben mit 9427 m in 30° 27.7′ S. B., 176° 39′ W. L.). Besonders reich an Gräben ist der Pazifische Ozean, wo sich an den ebengenannten Kermadecgraben nordwärts der Tongagraben anschließt, andere an der Westseite der Salomonen, im Süden von Yap und Pelau, an der Ostseite der Philippinen, an der Südseite der Riukiu, der Japanischen Inseln, der Kurilen und Aleuten folgen und der Marianen-

graben nordwärts im Boningraben seine Fortsetzung findet. Bedeutend ist auch der Atakamagraben entlang der tropischen Westküste Südamerikas (7635 m Maximaltiefe). Einige neuerdings genauer durchlotete Gräben erscheinen verdoppelt, in dem eine Längsschwelle sie teilt; so der Sundagraben, und der nördliche Teil des Marianengrabens. Ob man es hier mit Staffelschollen oder mit Falten zu tun hat, bleibt einstweilen unklar. Gewiß ist, daß der Boden dieser Gräben den Ausgangsort für zahlreiche große Erdbeben bildet und daß Vulkaninseln die Landseite derselben begleiten; es sind offenbar die instabilsten Stellen des Meeresbodens. Bemerkenswert bleibt, daß diese größten Meerestiefen (mit rund 9600 m) den höchsten Landspitzen (8840 m Mount Everest) an Größenordnung gleich sind; man darf darin einen Maßstab für die Leistungsfähigkeit der dislozierenden Kräfte innerhalb der Erdkruste in ihrem Kampfe mit den entgegenwirkenden der Abtragung und Umlagerung erkennen.

3. **Bodensedimente**. Am Boden der Meeresbecken gelangen alle diejenigen Materialien zur Ablagerung, die im Seewasser nicht löslich sind; man kann nach ihrer Herkunft unterscheiden: 1. die vom Festland herrührenden terrigenen, 2. die aus den Salzen des Seewassers unmittelbar als Niederschlag entstandenen halmyrogenen, 3. die von den Organismen des Meeres gelieferten biogenen und 4. die aus dem Weltenraum zugeführten kosmogenen Sedimente. Von diesen sind die terrigenen und biogenen bei weitem überwiegend. Die terrigenen sind ihrer Entstehung nach a) klastische, aus der Zerstörung der Landgesteine herrührend; b) vulkanische, c) glaziale; die biogenen kann man in benthogene, planktogene und nektogene unterscheiden; die letzteren sind von geringer Bedeutung. Die den Meeresboden bedeckenden Sedimente sind aber meist zusammengesetzt sowohl aus terrigenen wie biogenen Bestandteilen, und sie haben je nach ihrer geographischen Lage, insbesondere ihrem Abstand vom Lande und ihrer Wassertiefe, einen typisch verschiedenen Charakter, so daß sich eine rein genetische Einteilung praktisch nicht empfiehlt. Am besten unterscheidet man drei Hauptgruppen von Meeresablagerungen: 1. die litoralen Ablagerungen im Strand- und Schelfgebiet; 2. die hemipelagischen auf den Außenrändern der Kontinentalsockel und in den Tiefenbecken der landumschlossenen Mittelmeere; 3. die eupelagischen, die recht die eigentlich landfernen Tiefseeböden bilden.

3a) Die litoralen Ablagerungen entstammen vornehmlich dem trockenen Land und nehmen ein Areal von rund 33 Mill. qkm ein; ihre Ausgestaltung erfolgt im Bereiche des Strandes unter den Einwirkungen der Verwitterung einerseits, der Wellenwirkung andererseits. An Felsküsten höherer Breiten mit starker Brandung bilden sich am Strand ganze Blocklager, die in den weniger bewegten Nachbarbuchten zu Kies- und Sandlagern übergehen. In ruhigen Buchten oder hinter Sand- und Dünenzungen bilden sich Schlicklager aus der feinsten tonigen Trübung, die im Seewasser schwebt; ihnen pflegt reichlich biogenes Material beigefügt zu sein, wie in den Klei- und Knickböden unserer Watten und Marschen an der Nordsee, in denen mikroskopische Diatomeen zusammen mit Verwesungsresten anderer planktonischer Organismen den Flußschlamm schwarz färben. In den tropisch warmen Gewässern gewinnen die riffbauenden Korallen mit ihrer formenreichen Lebensgemeinschaft von kalkabscheidenden Tieren und Algen stellenweise große Bedeutung und beherrschen dann die Strandablagerungen mit ihrem Korallensand. — Seesalzlager sind als natürliche Gebilde am Meeresstrande nur sehr selten und auch dann nur von ganz kleinen Maßen bekannt; so u. a. vereinzelt am Roten Meer, an der chilenischen Küste, auf der Kapverdeninsel Sal, wo jede Springflut die kleine Kraterpfanne mit Seewasser auffüllt, das dann in dem trockenen Klima rasch verdunstet und eine Schicht von Seesalz und Gips hinterläßt. Bildungen, wie sie die ausgedehnten fossilen Steinsalzlager vorstellen, fehlen dem heutigen Meeresstrande ganz. Von dem Strandgebiete her wird das beweglichere Material vornehmlich durch Gezeitenströme und den bei auflandigem Winde in der Tiefe auftretenden Sogströmen seewärts entführt und über die Schelfflächen ausgebreitet. Die am Boden bis in 50 m Tiefe noch kräftige Wellenbewegung schiebt alle Sände und Schlicke hin und her, schleift sie gegeneinander und kann sie bei Stürmen auf größere Strecken hin vertriften. Nur in den größeren kessel- und furchenartigen Eintiefungen der Schelfflächen sammelt sich der feinere, meist mit organischen Resten stark durchsetzte schwärzliche Mud an. Bezeichnend für alle diese Seichtwasserablagerungen ist die fast regelmäßige Zumengung von Landpflanzenteilen, die von den Flüssen bei ihren Hochwassern in großen Mengen der See zugeführt werden; tropische Riesenflüsse, wie der Kongo oder der Amazonas können ganze schwimmende Inseln ins Meer hinaussenden, wo dann Röhricht oder Zweige, Früchte, Blätter von Bäumen erst mehrere hundert km fern vom Lande zum Meeresboden absinken. Die große Masse der fluviatilen Trübe schlägt sich schon in nächster Nähe der Flußmündungen nieder, da das Seewasser, wie alle Elektrolyte, die Eigenschaft hat, mechanische Trübungen in kürzester Zeit auszuscheiden. Diese Klärfähigkeit des Seewassers wird durch steigenden Salzgehalt und höhere Temperatur etwas, wenn

auch nur wenig verstärkt; nach Bodländers Versuchen wäre diese merkwürdige aktive Wirkung vornehmlich dem Chlormagnesium unter den gelösten Seesalzen und der stets reichlich vorhandenen Kohlensäure zuzuschreiben. Die allerfeinsten Tonteilchen halten sich aber auch im Seewasser sehr lange Zeit in kolloidalem Zustande schwebend. — Neben den echt terrigenen, also wesentlich klastischen oder auch in Staubform durch die Atmosphäre zugeführten Ablagerungen treten nicht selten vulkanische Auswürflinge in Form geschichteter Tuffe oder auch Lavamassen auf; ebenso können in den hohen Breiten beider Hemisphären unter den Schelfablagerungen glaziale Geschiebe sehr wichtig werden. Der nordsibirische Schelf, die Bodenfluren der Barentssee, der Ostsee, der Hudson- und Baffinbai, sowie der Neufundlandbänke werden von Treibeis mit Geschieben bestreut, die oft eine beträchtliche Größe besitzen. In der Ostsee sind besonders der Bottnische und Finnische Golf der Schauplatz solcher Blockvertriftungen, die aber in strengen Wintern auch ihren Weg durch den Sund ins Kattegat hinaus nehmen können. — Auf den Schelfflächen kommt es zu Abscheidungen von Manganerzen auf freiliegenden Teilen von Steinen, Muscheln- oder Kalkalgenscherben, die wohl nach Sir John Murray und Irvine auf Zufuhr von gelösten Manganverbindungen der Flußwasser beruhen dürften. Die in gewissen Schelfgebieten reichlich gebildeten Phosphatkonkretionen werden von denselben Forschern auf verwesende tierische Substanz zurückgeführt, indem die betreffenden Meeresstriche (u. a. Neuenglandbänke, Agulhasbank) von starken Schwankungen der Wassertemperaturen durch Verlagern der Meeresströme betroffen werden, wobei ein Massensterben im Plankton wie im Nekton die Folge ist.

3b) Die hemipelagischen Ablagerungen zeigen ein Gemisch von reichlich terrigenen Sedimenten mit wesentlich planktogenen der Hochsee; mit einem Areal von 55 bis 56 Millionen qkm beherrschen sie die Kontinentalböschungen von mehr als 200 m Tiefe und können sie, wenn der Schelf schmal ist, bis zu 4000 m hinabreichen. Ebenso erfüllen diese feinkörnigen Schlicke die geräumigen Becken der Nebenmeere, insbesondere der großen Mittelmeere, sowie die schmalen Außenmulden der Randmeere. Schon Sir John Murray und Renard unterschieden nach der Färbung blauen, roten und grünen Schlick, zu denen noch der Kalkschlick hinzuzufügen ist. Neben den terrigenen Mineralien sind auch für sie noch Reste der Landvegetation bezeichnend. In frischen Lotproben zeigt der blaue Schlick eine schiefergraue, bläuliche, auch graugrüne Färbung, dabei die oberste Schicht ins bläuliche oder rötliche verändert durch Anwesenheit von Eisenoxyden oder Eisenhydraten, die tiefer im Boden, wo die organischen Substanzen stärker zersetzt sind, in Eisensulfide übergehen und damit die dunklere Färbung herbeiführen. Wechselnd ist der Gehalt an Kalkkarbonaten, die aus Foraminiferenschalen und anderen planktonischen Resten, aber auch von bodenbewohnenden Formen herrühren, die jedoch in der Regel nur $^1/_8$ des Ganzen, selten bis zu $^1/_4$ betragen. In den heimischen Meeren ist die Norwegische Rinne und das Skagerrak mit diesem dunkeln Schlick erfüllt, dem viele Kalkschalen der benthonischen Uvigerina pygmaea und planktonischen Globigerina bulloides beigemengt sind. Das tiefe arktische Zentralbecken trägt nach Nansen ein fossilleeres braunes Sediment von 1 bis 3% Kalkgehalt, das am sibirischen Schelfhange von einer 10 cm mächtigen Decke grauen Tons überlagert wird, in dem vereinzelt benthonische Foraminiferen vorkommen; wie Nansen annimmt, ist dies ein Beweis für eine Hebung des Schelfs, wobei die Küste mit ihren terrigenen Materialien näher an die größeren Tiefen heranrückt. In der kleineren Tiefenmulde des europäischen Nordmeers, wird ein kalkreicheres braunes Sediment (25 bis 40 % Kalk von benthonischen Foraminiferen, insbesondere Biloculina) von einem fast kalkfreien grauen Ton unterlagert, dessen Entstehung Nansen auf die Eiszeit zurückführt, während welcher die Zufuhr von kontinentalem Detritus gesteigert, das Plankton aber verarmt wäre. Typisch ist der blaue Schlick in den Tiefenmulden des Australasiatischen Mittelmeers entfaltet; in der sonst kalkarmen Masse finden sich teilweise große Kalkkonkretionen eingestreut. Der rote Schlick ist eine in der Tropenmeeren verbreitete Abart des vorigen, wo große Flüsse aus Lateritgebieten her stark von Eisenoxyd gefärbte Trübe mit sich führen. Der grüne Schlick oder Grünsand ist vor flußarmen Felsküsten vorzugsweise der Subtropen verbreitet und durch seine auffallenden Mengen von grünem Glaukonit in Steinkernen von kalkabscheidenden Organismen gefärbt; nach Murray und Renard beherrscht er etwa 3 Mill. qkm. — Im Amerikanischen und im Romanischen Mittelmeere, ebenso im Roten Meer, herrscht ein kalkreiches Sediment vor, doch besteht etwa $^1/_4$ der Masse aus terrigenen feineren und gröberen Mineralteilen; unter den erkennbaren organischen Resten überwiegen die Schalen der Pteropoden. Stellenweise kommt es unter Mitwirkung benthonischer Organismen zur Abscheidung von harten Kalkkrusten. Eine besondere Stellung nehmen die Bodenablagerungen des Schwarzen

Meeres ein, dessen Schichten unter dem Niveau von 230 m ungenügend ventiliert und daher reich an Schwefelwasserstoff sind; das Sediment ist ein von sehr reichlichem Eisensulfid schwarzblau gefärbter zäher Schlick mit kleinen pulverigen Knötchen von kohlensaurem Kalk. — Ein mächtiger Gürtel von hemipelagischem Schlick besonderer Art umgibt den Außenrand des antarktischen Schelfs, wobei glaziale Geschiebe aller Art vom feinsten Schleifmehl bis zu zentnerschweren Blöcken die Hauptmasse liefern. Nach Philippi erhält dieses „glazialmarine" Sediment dadurch eine hellere Farbe, daß ihm Schwefeleisen völlig fehlt; auch Kalk ist nur in ganz geringen Mengen oder gar nicht vorhanden, und die Tonsubstanz der echten Blauschlicke ist hier durch feines Gesteinsmehl ersetzt, in welchem die Mineralsplitter und -brocken meist noch frisch erhalten sind.

3c) Die eupelagischen Sedimente erfüllen die eigentlich ozeanische Tiefseeflur und beherrschen 3/4 des ganzen irdischen Meeresbodens, mit ihren charakteristischen Ablagerungen, von denen man seit den Tagen der Challenger-Expedition fünf Arten unterscheidet: den Globigerinen-, Pteropoden-, Diatomeen- und Radiolarienschlamm und den roten Tiefseeton. Wie aus den Namen hervorgeht, ist bei den vier erstgenannten Sedimenten der planktogene Ursprung offenkundig, sie bestehen teils aus Kalkgehäusen der die oberen Schichten der Meere belebenden Foraminiferen (Globigerina, Orbulina, Pulvinulina u. a. m.) oder Mollusken (Pteropoden), teils aus Kieselgerüsten der Radiolarien und Kieselkapseln der Diatomeen. Die terrigenen Substanzen werden ganz gering. Nach den Untersuchungen von John Murray und R. Irvine kann sich feinste Tontrübe in einem kolloidalen Zustande noch monatelang schwebend im Seewasser halten: nach einem Monat in einer Wassersäule von 1 qm Querschnitt und 5000 m Höhe noch im Gesamtgewicht von 750 g. So langsam die Abscheidung auch erfolgen mag, nach den ungeheuren Zeiträumen, mit denen sich die Prozesse abspielen, wird sie doch erkennbar werden. Außer diesen Tonteilchen kommen noch solche in Betracht, die in Staubform, namentlich bei Vulkanausbrüchen, durch die Luftströmungen weithin verbreitet werden, und endlich Auswürflinge von submarinen oder litoralen Vulkanen. Unter den letzteren entfalten Bimssteine eine hervorragende Schwimmfähigkeit; nach Thoulets Experimenten versinken Bimssteinbrocken von Nußgröße und 3 bis 4 g Trockengewicht in Seewasser erst nach 22 Monaten, können also von Meeresströmungen weithin vertriftet werden. Auf dieser immerhin spärlichen mineralischen Grundlage häufen sich die Schalen und Gerüste der genannten Planktonformen in mehr oder weniger lebhaftem Tempo auf; wo sie fehlen oder durch Lösungsprozesse beseitigt sind, wird das anorganische Sediment als Grundlage sichtbar und erscheint dann als der rote Tiefseeton.

Der Globigerinenschlamm ist das wichtigste dieser biogenen Sedimente; er beherrscht mit 106 Mill. qkm fast ein Drittel des ganzen irdischen Meeresbodens, und da Globigerinen auch sonst den übrigen Tiefseeablagerungen meist nicht ganz fehlen, werden sie bezeichnend für die rezenten Meere überhaupt. Sie beleben die obersten 200 m der Hochsee, und nähren sich von einer mikroskopischen Planktonflora, in der als Kalkproduzenten die Coccolithophoriden bedeutsam werden; die winzigen Kalkschildchen, mit denen diese Algen ihre Zellen umkleiden, sammeln sich ebenfalls am Meeresboden an und können stellenweise mehr als 2/3 des ganzen Sediments ausmachen. In diesem häufen sich auch, obschon untergeordnet, die Kalkreste von Echinodermen, Mollusken, Anneliden, Tiefseekorallen, Polyzoen und anderen benthonischen Formen an. Behandelt man das Sediment mit verdünnter Salzsäure, so kommen auch die kieseligen Reste von Diatomeen und Radiolarien zum Vorschein, beanspruchen aber ebenso wie die benthonischen Bestandteile selten mehr als 1/10 der ganzen Masse. Der Globigerinenschlamm ist wesentlich in Tiefen von über 2500 und weniger als 4500 m verbreitet, nur vereinzelt werden 5500 m erreicht; seine mittlere Tiefenlage ist auf 3700 m berechnet. Dabei ist bemerkenswert, daß der Kalkgehalt nach den größeren Tiefen hin rasch abzunehmen beginnt: bei den Proben der Challenger-Expedition aus mehr als 4500 m sank er unter 50 %, und entsprechend nahmen die wesentlich mineralischen Abschlämmteilchen zu. Die dem Sediment beigemengte organische Substanz einschließlich der Faeces ist meist nicht erheblich, doch finden sich am Meeresboden Schlammfresser, die ihre Nahrung daraus entnehmen. Wie zuerst H. Gümbel aus den Proben der Gazelle-Expedition nachwies, handelt es sich dabei nicht nur um albuminose Reste, sondern auch um Fette, die in blendend weißen Knöllchen auftreten und rund 1/1000 des Sediments bildeten. In den Globigerinenschalen kommt es nicht selten, wenn auch nicht so reichlich wie in den hemipelagischen Sedimenten, zu Abscheidungen von Glaukonit; auch solche von Mangan und Phosphatkonkretionen sind spärlich. — Das Sediment hat seine hauptsächlichste Verbreitung in den wärmeren Teilen des Atlantischen Ozeans (54 % der

Fläche), auch im Indischen Ozean ist es noch wichtig (43 %), dagegen tritt es im Pazifischen Ozean (18 % der Fläche) sehr zurück.

Der Pteropodenschlamm ist eine wenig verbreitete Abart des Globigerinenschlamms; die mit bloßem Auge sichtbaren kegel- oder tütenförmigen Gehäuse der Pteropoden Limacina, Clio und Cavolinia und die Reste einiger Heteropoden Carinaria und Atlanta bilden dann höchstens $^1/_3$ bis ½ des Ganzen, der Rest bleibt den Foraminiferen. Die meist sehr delikaten Pteropodenschalen erhalten sich kaum in größeren Tiefen als 2700 m, und so ist dieses Sediment auf den seichteren Rücken (z. B. bei den Azoren, Antillen, zwischen Ascension und St. Helena, oder im Pazifischen Ozean um die Fidschi- und Paumotu-Inseln) auf kaum 1½ Mill. qkm Fläche zu finden.

Der Diatomeenschlamm ist im Gegensatz zu den vorigen mehr ein Gebilde der höheren Breiten beider Hemisphären und setzt sich zu $^2/_3$ aus den kieseligen Frustulen der Diatomeen zusammen; den Rest bilden auch hier gewöhnlich Foraminiferen. Die deutsche Tiefsee-Expedition an Bord der „Valdivia" fand aber am Außenrande des südhemisphärischen Treibeises streckenweise auch fast reinen Kieselgur mit 95 % Diatomeenpanzern ohne allen Kalkgehalt; es überwogen darin Fragilarien, daneben waren Thalassiothrix, Synedra, Eucampia, Coscinodiscus sehr zahlreich, auch Rhizosolenien und Dictyocha-Skelette kamen vor. Bemerkenswert ist ein reichlicher Zusatz von größeren Radiolarien, während Mineralien von geringer Korngröße (stets unter 1 mm) kaum 4 % bilden. Obwohl die Diatomeen die oberen Wasserschichten innerhalb des Treibeises sehr reichlich bevölkern und dieses beim Einfrieren strohgelb bis bräunlich färben können, ist das Hauptgebiet des Diatomeenschlammes nördlich von der Treibeisgrenze zu finden; wie Philippi wohl richtig angibt, sind es die Eisschmelzströme, die diese leichten Körper in den tieferen Wasserschichten in den Ozean hinausführen. Der Diatomeenschlamm ist bis zu Tiefen von mehr als 4800 m nachgewiesen. Außer in den höheren Nord- und Südbreiten kommt Diatomeenschlamm auch gelegentlich in den Tropen vor: im Pazifischen Ozean zwischen der peruanischen Küste und den Galápagos-Inseln (bis 5200 m), und fleckweise zwischen den Marianen und Philippinen (bis 6000 m) insbesondere der riesige Coscinodiscus rex von 0,8 mm Durchmesser). Insgesamt dürfte das Areal auf 23 Mill. qkm zu veranschlagen sein.

Die eigentlich abyssischen Räume des Meeresbodens werden von dem roten Tiefseeton und dem ihm verwandten Radiolarienschlamm eingenommen; in weniger als 4000 m Tiefe sind sie bisher nicht mit Sicherheit nachgewiesen. Während die vorher genannten planktogenen Sedimente eine graue Färbung aufweisen, ist der Tiefseeton rötlich bis bräunlich oder schokoladenähnlich gefärbt, was mit reichlichem Auftreten von Eisenoxyden und Braunstein zusammenhängt. Die Masse besteht aus einem steifen, in frischem Zustande knetbaren Ton, der an der Luft zu großer Festigkeit erhärtet. Die beim Dredschen heraufgeholten größeren Proben zeigen, daß es sich nicht durchaus um ein homogenes Sediment handelt, indem neben größeren und kleineren Brocken von zersetztem Bimsstein und vulkanischen Gläsern organische Reste in Gestalt von Haifischzähnen und Gehörknöchelchen von Walen und Schildkröten eingebettet sind, und zwar umhüllt mit einem mehr oder minder mächtigen Belag von Braunstein (Mangansuperoxyd). Der Kalkgehalt ist äußerst gering in den typischen Proben; aus Tiefen von mehr als 5000 m herausgeholte haben kaum 1 %. An der oberen Grenze des Vorkommens erhebt sich der Kalkgehalt auf über 6 %, und Foraminiferenschalen, Fischzähne und Echinodermenfragmente in angefressenem Zustande werden erkennbar. Besser erhalten sind stets die kieseligen Reste von Radiolarien und Diatomeen, auch von Spongiennadeln. Die chemischen Prozesse, denen die Lösung der organischen Kalkschalen und -skelette zuzuschreiben ist, bieten dem Verständnis noch die größten Schwierigkeiten dar; es handelt sich um niedrig temperierte, sauerstoff- und kohlensäurereiche Wassermassen unter einem Drucke von über 400 Atmosphären und, was sehr wesentlich, um ungeheure Zeiträume, in denen sich die Wirkungen auch an sich schwacher Reaktionen aufsummieren. Nicht leicht zu begreifen ist insbesondere, wo die in Lösung gegangenen Kalke verbleiben. Daß die Hauptmasse des Tons aus vulkanischen Auswürflingen aller Art besteht, ergab die mikroskopische Analyse deutlich, denn nicht alles ist bereits bis zur Unkenntlichkeit zersetzt. Diese feinsten Trümmer von Sanidin, Plagioklas, Hornblende, Augit, Magnetit, Palagonit (Gesteinsglas) stammen sowohl von unterseeischen Eruptionen her, wie sie auch als Aschenstaub von festländischen oder Inselvulkanen durch die Luftströmungen weithin verschleppt sein können. Für das außerordentlich langsame Tempo, in welchem der rote Ton sich anhäuft, sprechen folgende Beobachtungen. Murray und Renard haben als häufige Beimengung im Ton schwarze Meteoreisenkügelchen (Holosiderite) von 0,1 bis 0,2 mm Durchmesser und braune

Chondrite von 0,3 bis 1,0 mm nachgewiesen, und zwar finden sich durchschnittlich im Liter Ton aus dem landfernsten pazifischen Gebiet 20 bis 30 schwarze und 5 bis 6 braune Meteorkörnchen, während sie in einem Liter Globigerinenschlamm nur ganz vereinzelt, wenn überhaupt zu erhalten waren, was unzweifelhaft auf eine flottere Abscheidung des Globigerinenschlamms hinweist. Ferner sind die Manganabscheidungen an den im Ton liegenden Fremdkörpern (Bimssteinbrocken, Knöchelchen, Fischzähnen) derart verschieden, daß sich Körper mit ganz leichtem braunen Anflug neben großen Knollen finden, die viele cm dicke Manganhüllen tragen; diese für den Tiefseeton charakteristischen Manganknollen, in Größen von kleinsten Körnchen bis zu kinderkopfgroßen Zusammenballungen um einen Fremdkörperkern herum, sind besonders im tropischen Teil des inselfreien Pazifischen Ozeans reichlich verbreitet und bedecken den Boden als ein mächtiges Manganeisenlager. Die Einschlüsse dieser Knollen sind nach Murray und Al. Agassiz teilweise bis in tertiäre Zeiten zurückzudatieren, da sich darunter Zähne von Haifischen und Gehörknöchelchen von Walen und Delphinen gefunden haben, die aus den heutigen Meeren nicht mehr bekannt sind, wohl aber aus dem Tertiär. Bei der Abscheidung des Tiefseetons hat man also mit wahrhaft geologischen Zeitläuften zu rechnen. Auch die mineralischen Neubildungen, insbesondere von einem Zeolith (Phillipsit), von dem auch Durchkreuzungszwillinge häufig sind, weisen auf dieselbe Auffassung hin. — Die geographische Verbreitung des Tiefseetons ist sehr merkwürdig, insofern als er im Atlantischen Ozean nur in wenigen kleinen isolierten Mulden auftritt (nur 14 Mill. qkm), etwas mehr davon im Indischen Ozean (15 Mill. qkm), aber sein Hauptgebiet im Pazifischen Ozean (101 Mill. qkm = 61 % der Fläche) beherrscht, so daß er für die Wasserhalbkugel der Erde ebenso bedeutsam wird, wie der Globigerinenschlamm für die Landhalbkugel.

In einigen Teilen des Pazifischen Ozeans sind dem Tiefseeton die Kieselgerüste von Radiolarien so reichlich beigemengt, daß er weniger plastisch und meist auch heller wird; wo dieser Zusatz mehr als 20 % erreicht, spricht man von Radiolarienschlamm. Die meist zertrümmerten und partiell zersetzten Kieselgerüste gehören überwiegend den Familien der Nassellarien und Spumellarien, auch wohl der Phaeodarien an. Dem Atlantischen Ozean scheint diese Abart des Tiefseetons gänzlich zu fehlen, auch der Indische hat nur wenig davon, die große Hauptmasse des gesamten Radiolarienschlammes (12 Mill. qkm) findet sich im tropischen Teil des Pazifischen Ozeans.

Abgesehen von dem auffälligen Auftreten des Diatomeenschlammes in den hohen Südbreiten ist, soweit die heutigen, nicht eben ausgedehnten Kenntnisse von der Verbreitung der verschiedenen Planktonformen reichen, in der Zusammensetzung und Art der eupelagischen Sedimente keinerlei Beziehung zu den Meeresströmungen nachweisbar; die größeren oder geringeren Meerestiefen allein scheinen wichtiger, wie namentlich aus der Verbreitung des Tiefseetons einerseits, des Globigerinenschlammes andererseits hervorgeht; die großen äquatorialen Meeresströmungen gehen spurlos über die verschiedenen Sedimente hinweg. Diese häufen sich bei ihrem überwiegend feinen Korn in der Regel ohne Schichtung auf; doch fehlt solche nicht ganz und ist namentlich bei dem modernen Lotungsverfahren, das gestattet, Säulen von mehreren Dezimetern Länge (bis 80 cm auf der deutschen Südpolarexpedition) auszustanzen, gelegentlich in recht komplizierter Form erwiesen. Eine vereinzelte Vulkaneruption hinterläßt im weißlichen Globigerinenschlamm eine schwarze feine Membran von Aschenteilchen (so vom Challenger östlich von der Laplatamündung gefunden), bei wiederholten Aschenfällen stellt sich ein Wechsel von dunkleren und helleren Bändern ein, wie bei den Azoren und in der nordafrikanischen Mulde vom Fürsten von Monaco erwiesen. In anderen Fällen haben wir es mit deutlichen Anzeichen für Krustenbewegungen zu tun. Wenn die oberste Schicht der heraufgeholten Probe aus Globigerinenschlamm, die tieferen Teile aber aus rotem, kalkfreiem Ton bestehen, so liegt offenbar eine Hebung des Meeresbodens vor: so von Challenger im Südpazifischen Ozean in 26° S., 145° W. in 3795 m und in 38° S., 88° W. in 3338 m gefunden; nicht weit von der zuerst genannten Stelle, in 33,5° S., 133,4° W. in 4270 m erhielt das Schiff eine Probe, wo roter Ton obenauf und Globigerinenschlamm darunter lag, was auf eine Senkung des Bodens hindeutet. Solcher Beispiele sind seitdem noch mehr bekannt geworden; am auffälligsten ist wohl ein Befund der Deutschen Südpolarexpedition im Romanchetief des zentralen Atlantischen Ozeans (0° 11′ S., 18° 16′ W. 7230 m): der oberste Teil der ausgestanzten 46 cm langen Säule bestand aus rotem Tiefseeton mit vielen Mineralkörnern nicht vulkanischen Ursprungs, der mittlere Teil aus blauem hemipelagischen Schlick fast ohne Mineralkörner, die untersten 1,8 cm aus hellgrauem Globigerinenschlamm, woraus (mit E. Philippi) zu entnehmen ist, daß eine zuerst mit Globigerinenschlamm bedeckte Schwelle in den Bereich hemipelagischer Ablagerung gehoben und so den Einwirkungen des näher gelegenen Festlandes unterworfen war, um dann wieder zu den großen Tiefen von mehr als 7000 m abzusinken. Diese Dislokation konnte nicht ohne gewaltsame Beanspruchung der darunter liegenden Gesteine vor sich gehen, so daß bei ihrer Zertrümmerung (wahrscheinlich war es Hypersthengneis) Mineralkörner in das Sediment gerieten. Anstehendes Gestein von Bruchstufen oder zertrümmerten Inseln herrührend hat sonst ganz unverständliche Mineralbeimengungen auch an vielen anderen Stellen dem eupelagischen

Sediment zugeführt; man kennt solche aus dem Biskayagolf, von der Tiefsee südöstlich von den Neuenglandbänken, aus der Kapmulde, dem westafrikanischen Becken usw. In den Lotungslisten werden diese Bodenproben als sandig beschrieben; die mineralogische Prüfung ergibt viel Quarz, Feldspat, Biotit, Hornblende u. dgl. Nach alledem darf man sich den Meeresboden nicht etwa gänzlich in Ruhe vorstellen; abgesehen von vulkanischen Ausbrüchen ist er auch der Schauplatz von Dislokationen aller Art; Faltungen, Verwerfungen und damit zusammenhängende Abrutschungen und Bergschlipfe fehlen auch den abyssischen Räumen nicht. Doch weist andererseits der gleichmäßige Belag mit losem Globigerinenschlamm darauf hin, daß es sich überwiegend um langsame Bewegungen handeln wird, um Mulden und Sättel von großer Spannweite. Immerhin kann es vorkommen, daß auch Tiefseetone bis über den Meeresspiegel hinaufgehoben sind und wie auf Barbados gesteinbildend auftreten, doch ist im allgemeinen die Seltenheit solcher Gesteine, die den eupelagischen Sedimenten der heutigen Meere entsprechen, in den älteren Erdschichten sehr bemerkenswert. Selbst die Aequivalenz der Kreide mit dem heutigen Globigerinenschlamm ist nicht unbestritten, da die Hauptmasse der kretazeischen Foraminiferen benthonischen Formen (Textularia globulosa) angehört und Einschlüsse von Quarzkörnchen viel reichlicher sind als im heutigen Sediment, so daß auch hier an hemipelagische Bedingungen zu denken wäre. Litorale und hemipelagische Sedimente sind dagegen in den älteren Erdschichten reichlich vertreten. Doch bedarf es noch einer viel umfassenderen mikroskopischen Analyse außereuropäischer Gesteine, ehe man in dieser wichtigen Frage zu einem klaren Urteil vordringen mag. Erst dann wird es möglich sein, die von der einen Seite lebhaft behauptete (Dana, Jukes-Browne, Sir John Murray, Joh. Walther), von anderer bestrittene (Sueß) Permanenz der großen abyssischen Becken mindestens seit Abschluß des Mesozoikums anders als durch mehr oder weniger plausible Spekulationen zu prüfen.

4. Das Meerwasser. 4a) Der Salzgehalt. Das Meerwasser ist durch zahlreiche in ihm aufgelöste Salze vom süßen oder „frischen" Wasser des Landes verschieden. Von den rund 80 Elementen der Chemie hat man im Meerwasser teils frei, teils in Verbindungen, teils in Abscheidungen der Meeresorganismen 32 nachweisen können, darunter die Mehrzahl allerdings in einem sehr verdünnten Zustande oder in Spuren, oft nur durch spektroskopische Untersuchung der Mutterlaugen der Seesalinen und der Kesselsteine von Seedampfern. In größeren Mengen sind abgesehen vom Wasserstoff und Sauerstoff des Wassers selbst nur wenige Elemente vertreten: Chlor, Brom, Schwefel, Kalium, Natrium, Calcium, Magnesium, dazu die atmosphärischen Gase Stickstoff und der Kohlenstoff der Kohlensäure. Nach den Vorstellungen, die man beim Verdampfungsprozeß in den Seesalinen schon früh gewann, sollen die genannten Elemente in Gestalt von Salzen gelöst sein, die teils als Chloride aufgefaßt werden (Chlornatrium oder Kochsalz NaCl, Chlormagnesium $MgCl_2$, Chlorkalium KCl), teils als Sulfate (Magnesiumsulfat oder Bittersalz $MgSO_4$, Calciumsulfat oder Gips $CaSO_4$) oder auch als Karbonat (von Calcium $CaCO_3$) und ein wenig Bromür (von Magnesium $MgBr_2$). Die Analysen selbst bezogen sich stets auf die Feststellung des Gehalts an Chlor (meist mit den Halogenen Brom und Jod), an Schwefelsäure (SO_3), Magnesia (MgO), Kali (K_2O), Natron (Na_2O), Kalk (CaO) und Kohlensäure (CO_2). Wenn angegeben wird, daß unter den Seesalzen das Chlornatrium 77,7, das Chlormagnesium 10,9, das Magnesiumsulfat 4,7, Calciumsulfat 3,6, Kaliumsulfat 2,5 Gewichtsprozente ausmachen, so ist das nur ein Ergebnis chemischer Rechnung. Aus den Analysen selbst ergibt sich, daß den ganzen Salzgehalt = 100 gesetzt, nach Dittmar entfallen: auf Chlor 55,4, Schwefelsäure 6,4, Kalk 1,7, Magnesia 6,2, Kali 1,3 und Soda 41,4; oder anders ausgedrückt kommen auf 1000 Atome Chlor solche von Natrium 849, Magnesium 102, Calcium 19, Kalium 18, Sulfat (SO_4) 51, Karbonat (CO_3) 2 und Brom 1. Das Verhältnis dieser Komponenten untereinander ist merkwürdig gleichmäßig in den verschiedenen Meeren; so nach 77 Analysen Dittmars z. B. für Natrium nur schwankend zwischen 847,0 und 855,2, für Magnesia von 98,9 bis 102,9. Seit Forchhammer (1859) hat man deshalb das Chlor als Maßstab für den gesamten Salzgehalt einer gegebenen Seewassermenge betrachtet und in meist genügender Annäherung den Salzgehalt $S = 1{,}811$ Cl gesetzt, wobei der Chlorgehalt in Gewichts-‰ auch den Salzgehalt in ‰ (Gramm pro kg Seewasser) angibt. Nach den neuen, sehr viel genaueren Analysen von S. P. L. Sörensen und Martin Knudsen hat sich ergeben, daß man besser $S = 0{,}030 + 1{,}8050$ Cl setzt, was bedeutet, daß das reine (destillierte) Wasser nicht als ein spezieller Fall des Seewassers zu betrachten ist.

Von den übrigen noch im Meerwasser nachgewiesenen Elementen sind Fluor im Kalk der Korallenstöcke und im Kesselstein vorhanden, Phosphor, Bor und Silicium im Abdampfrückstand, ebenso Mangan, Eisen, Aluminium, Arsen, Lithium, Rubidium, Cäsium; in Abscheidungen und Speicherungen der Seetiere und -Pflanzen fanden sich die Metalle Kupfer, Blei, Zink, Nickel, Kobalt. Auch Silber und Gold sind im Seewasser gelöst vorhanden, von Silber nach Malaguti „mindestens 1 mg in 100 l", während das Gold bisher noch nicht quantitativ, sondern nur durch eine Farbenreaktion bestimmt ist; die Schätzungen von Sonnstadt und Liversidge 1 grain pro ton, also 64,8 mg in 1016 kg) oder von C. A.

Münster (5 bis 6 mg in 100 l) sind ohne Grundlage und irreführend.

Den gesamten Salzgehalt durch Eindampfen eines gegebenen Quantums von Seewasser zu bestimmen, mißlingt daran, daß beim Austreiben der letzten Reste des Wasserdampfes bis zur Rotglut mehr oder weniger Salzsäure (HCl) und Kohlensäure (CO_2) entweicht und der Verlust nicht, wie man meinte, durch einen Korrektionsfaktor auszudrücken ist. Sörensen und Knudsen haben daher eine neue Definition des Salzgehalts vorgeschlagen, und verstehen darunter alle in 1000 g Wasser gelösten festen Stoffe, aber mit der Einschränkung, daß das Brom durch eine äquivalente Menge von Chlor ersetzt, alles Karbonat in Oxyd umgebildet und alle organischen Stoffe verbrannt gedacht werden. Dieser so definierte Salzgehalt bleibt etwas (zwischen 0,10 und 0,15 ‰) hinter dem früher gemeinten zurück, ist aber durch die sehr bequeme und zuverlässige Bestimmung des Chlorgehalts durch Titration mit Silbernitrat leicht zu finden.

Die Herkunft der Salze im Seewasser ist umstritten. Einige wollen den Salzgehalt als eine Auslaugung der festländischen Gesteine durch die atmosphärischen Gewässer auffassen, gehen also von der Meinung aus, daß die Meere ursprünglich von Süßwasser erfüllt gewesen seien, sie bleiben aber den Nachweis des Weges schuldig, auf welchem die Salze anfangs in die Gesteine selbst gelangt sind. Außerdem sind die in den Flüssen vorhandenen gelösten Salze wesentlich Karbonate, während im Meer die Chloride bei weitem überwiegen. Auch in den trockenen Zentralgebieten der Kontinente, wo sich konzentrierte Salzlösungen in abflußlosen Binnenseen finden, zeigen sie eine ganz abweichende Zusammensetzung, wie schon ihre Bezeichnung als Bitterseen, Natronseen, Boraxseen usw. erkennen läßt. Demgegenüber steht die Ansicht, daß es sich im Meere um ursprüngliche Salze handle, die also von Anfang an mit dem Niederschlage des Meeres selbst auf der ersten Erstarrungskruste der Erde aufgetreten sind. Gestützt wird diese Erklärung durch die Tatsache, daß auch noch heute bei den Gasausbrüchen der Vulkane dieselben Chlor- und Schwefelverbindungen auftreten, deren Salze im Seewasser überwiegen. Hiernach wäre der Ozean selbst im wesentlichen ein Entgasungsprodukt des Erdkörpers, dessen magmatisches Innere mit jeder Vulkaneruption die Masse des Ozeans mit denselben Stoffen vermehrt, die ihm von Anfang an zugeführt worden sind, während die Salze der festländischen Sedimentgesteine nur aus dem Ozean abgeleitet und in wiederholtem Kreislauf zwischen ihm und dem Lande in Bewegung sind.

Der mittlere Salzgehalt des Ozeans dürfte fast 35 ‰ betragen. Große Unterschiede der Konzentration finden sich in den offenen Ozeanen nur in den oberflächlichen Schichten, wo durch starke Regenfälle, Eisschmelze und reichliche Zufuhr von Landwasser der Salzgehalt erniedrigt oder durch starke Verdunstung bei hoher Temperatur und geringem Niederschlage der Salzgehalt über das mittlere Maß erhöht wird. An der Oberfläche ist der Atlantische Ozean im ganzen salzreicher als der Indische und Pazifische. Eine Zone höchsten Salzgehalts mit etwas über 37 ‰ findet sich westwärts von den Kanarischen Inseln zwischen 30° und 17° n. B., der Kalmengürtel zwischen 5° und 10° n. B. hat etwas unter 35 ‰, und im Südatlantischen Ozean erhebt sich der Salzgehalt abermals im Passatgebiet an der amerikanischen Seite auf etwas über 37 ‰. Eine ähnliche zonenförmige Anordnung zeigt auch der Pazifische Ozean, doch erhebt sich das nordhemisphärische Maximum noch nicht auf 36 ‰, der Kalmengürtel kaum auf 34, das südhemisphärische Maximum nicht über 37 ‰. Im Indischen Ozean liegt der höchste Salzgehalt im Arabischen Meer mit 37 ‰ das südhemisphärische Maximum des Südostpassats mit 36,5 ‰ wird vom erstgenannten getrennt durch eine von den Sundainseln unter 0° bis 10° s. B. westwärts verlaufende Zone von etwas weniger als 35 ‰. Diese regionalen wesentlich aus meteorologischen Ursachen entstandenen Unterschiede verschwinden aber schon in Tiefen von etwa 300 m, und die große Masse des Ozeans scheint einen relativ gleichmäßigen Salzgehalt von etwas unter 35 ‰ zu besitzen.

Größer sind die Unterschiede in den Nebenmeeren. Im regenarmen Mittelländischen Meer hat das Balearenbecken an der Oberfläche 37 bis 38, das orientalische 38 bis 39 ‰, das Maximum liegt zwischen Cypern und der syrischen Küste mit fast 39,5 ‰, während in den Tiefen unterhalb von 500 m etwa 38,5 gefunden werden. Das Schwarze Meer ist durch die einströmenden Flußwasser an der Oberfläche auf 18 bis 18,5 ‰ verdünnt, während nach der Tiefe hin der Salzgehalt zunimmt und von 900 m abwärts 22,4 bis 22,5 ‰ beträgt. Den höchsten Salzgehalt hat die Oberfläche des Roten Meeres, in seinem nördlichen Teil über 40 bis 40,5 ‰, am südlichen Ende auf 37,8 bis 38 abnehmend; doch sind auch hier die Tiefengewässer mit 40 ‰ ausgestattet. Auch im Persischen Golf sind 40 bis 40,5 ‰ nachgewiesen. — In unseren heimischen Meeren erreicht die Nordsee an ihrem südwestlichen Ende zum Englischen Kanal hin etwas über 35 ‰, ebenso in ihrem mittleren Teil nördlich von der Doggerbank und nach den Shetlandinseln hin, während nach den Küsten, namentlich den festländischen hin, die Verdünnung durch das Landwasser sich geltend macht und in der Helgoländer Bucht nur 32 bis 33 ‰ gefunden werden. Im Skagerrak und Kattegat wird das ausfließende Ostseewasser namentlich an der schwedischen und norwegischen Seite verdünnend wirksam

der Salzgehalt nimmt schrittweise binnenwärts ab, überschreitet an der jütischen Seite des Kattegat kaum 32, an der schwedischen 20 bis 22 ‰, hält sich in den Belten und in der westlichen Ostsee mit großen von den Windwirkungen abhängigen Schwankungen zwischen 12 und 20 ‰, sinkt im weiten Gebiet zwischen Bornholm und den finnischen Schären auf 7 bis 8 ‰ und kann in den innersten Teilen des Finnischen und Bottnischen Golfs auf 1 bis 2 ‰ abnehmen, wobei die Oberfläche im Frühjahr völlig salzfrei wird. Nach den Tiefen nimmt überall der Salzgehalt zu, im Bottnischen Golf bis 4 und 5 ‰, bei Gotland auf 12 bis 13, nördlich von Rügen bis 16 und 18 ‰ mit unregelmäßigen Schwankungen.

4 b) Die allgemeinen physikalischen Eigenschaften. Das Seewasser ist im ganzen genommen als ein Gemisch verdünnter Lösungen aufzufassen und folgt in seinem physikalischen Verhalten den für diese geltenden Gesetzen. Demzufolge steigt das spezifische Gewicht mit zunehmender Konzentration und sinkt es mit zunehmender Temperatur, worüber die moderne Meeresforschung sich in sorgfältig ausgearbeiteten „Hydrographischen Tabellen“ von Martin Knudsen unterrichten kann. Drücken wir das spezifische Gewicht des Seewassers bei 0° bezogen auf reines Wasser von 4° durch S_4^0 aus und setzen $(S_4^0 - 1)\,1000 = \sigma_0$, so folgt dieses der Beziehung:

$$\sigma_0 = -0{,}093 + 0{,}8149\ S - 0{,}000\,482\ S^2 + 0{,}000\,0068\ S^3,$$

wo S den Salzgehalt in Promille bedeutet. — Die Temperatur, bei der das Maximum der Dichte eintritt, erhält man genau genug aus der Formel $\vartheta^0 = 3{,}95^0 - 0{,}266\ \sigma^0$. — Der Gefrierpunkt wird erniedrigt nach der Beziehung $\tau^0 = -0{,}0086 - 0{,}064\,633\ \sigma_0 - 0{,}0001055\ \sigma_0^2$, liegt also bei Ostseewasser von 10 ‰ bei —0,53°, bei Nordseewasser von 32 ‰ bei —1,74°, bei Ozeanwasser von 35 ‰ bei —1,91°. Sehr stark wächst mit steigender Konzentration der osmotische Druck, indem er für Ostseewasser bei Bornholm von 7,5 ‰ Salzgehalt und 18° Temperatur 4,9 Atm., für Wasser des Roten Meeres von 40 ‰ und 30° nicht weniger als 26,7 Atmosphären beträgt, was für Verpflanzung von marinen Organismen in Süßwasser oder Süßwasserbewohnern ins Meer von großer Bedeutung wird. — Mit zunehmendem Salzgehalt tritt eine (geringe) Erhöhung des Siedepunkts ein, was mit einer entsprechenden Erniedrigung des Dampfdrucks Hand in Hand geht. Nennen wir den Dampfdruck des reinen Wassers f_0, so besteht zu dem Dampfdruck f des Seewassers die Beziehung $(f_0 - f) : f = 0{,}000538\ S$, was bedeutet, daß Seewasser unter gleichen sonstigen Umständen langsamer verdunsten muß als süßes; doch beträgt für Mittelmeerwasser von S = 40 ‰ der Effekt nur 2 %. — Die Wärmekapazität des Seewassers ist gegen die des reinen Wassers vermindert (für Ozeanwasser etwa um 7 %), ebenso das thermische Leitvermögen (für Ozeanwasser etwa um 4 %), dagegen wird die Oberflächenspannung vermehrt, ebenso die innere Reibung (für Ozeanwasser um 5 %), die allerdings beträchtlicher von der Temperatur abhängt; dasselbe gilt für die elektrische Leitfähigkeit. Die Zusammendrückbarkeit des Seewassers ist an sich gering und noch etwas kleiner als die des reinen Wassers, doch sind die Wirkungen bei den kolossalen in Betracht kommenden Drucken nicht zu vernachlässigen; da angenähert mit je 10 m Tiefe der Druck um eine Atmosphäre wächst, haben wir es am Boden der offenen Ozeane mit Drucken von 400 bis 800 Atmosphären zu tun. Hierdurch wird die Dichtigkeit des Seewassers gesteigert und erreicht z. B. am Boden des Atlantischen Ozeans in 4000 m statt der vom Druck befreiten Dichtigkeit von 1,0280 eine tatsächliche in situ von 1,0467. Bei der Berechnung des gesamten Gewichts des Ozeans oder der im Ozean aufgespeicherten Salzmenge darf daher von der Zusammendrückung nicht abgesehen werden. Setzt man demgemäß in erster Annäherung die Durchschnittsdichte des Ozeans = 1,04, so erhält man ein Gesamtgewicht von 138×10^{16} Tonnen, was einem Salzvolum (mit einer Dichte von 2,22) von $2{,}18 \times 10^{16}$ cbm oder 21,8 Mill. cbkm entspräche, gleich einer Salzschicht von 60 m Höhe über dem Meeresboden.

Das Seewasser bricht das eindringende Licht stärker als das destillierte Wasser; beträgt für letzteres bei 18° der Brechungsindex der Natronlinie 1,33 308, so steigt er im Ozeanwasser von 35 ‰ auf 1,33 981. Das Wasser im offenen Ozean ist von großer Klarheit; weiße Scheiben von 2 m Durchmesser hat man in der Sargassosee noch bis 66,5 m Tiefe sehen können, während diese Sichttiefe in der Nordsee nur selten 20 m, in der Ostsee 13 m übersteigt. Die Durchsichtigkeit ist wesentlich von den beigemengten Trübungen sowohl mineralischer wie organischer Art beeinflußt. Seichte und planktonreiche Meere sind daher weniger durchsichtig. Die Farbe des Ozeanwassers ist wesentlich blau, mit einem schwächeren oder stärkeren Stich ins Graue, wo Trübungen auftreten; rein blau ist z. B. die planktonarme Sargassosee. Doch beschränkt sich diese bläuliche Färbung nicht auf die Tropenmeere, auch in hohen antarktischen Breiten hat man sie gefunden. Die seichteren Meere

sind blaugrün bis flaschengrün, wie die Nordsee und Ostsee.

4c) Der Gasgehalt. Wie alle Flüssigkeiten absorbiert das Meerwasser die atmosphärischen Gase, also Sauerstoff, Stickstoff (einschließlich Argon) und Kohlensäure, und zwar ist der Absorptionskoeffizient etwas geringer als im süßen Wasser, aber die Zusammensetzung des Gasgemisches eine erheblich andere als in der Atmosphäre: besteht in dieser das Volumverhältnis von O zu N wie 21: 78, so wird es im Seewasser wie 34 zu 63, so daß die im Meer absorbierte Luft erheblich reicher an Sauerstoff ist als die atmosphärische. Die absorbierte Menge sinkt erheblich mit Ansteigen der Temperatur und des Salzgehalts; man erhält sie in ccm per l für 760 mm Luftdruck nach Charles Fox aus folgenden Formeln, wo Cl den Chlorgehalt in ‰ bedeutet:

$$O = 10{,}291 - 0{,}2809\,t + 0{,}006\,009\,t^2 - 0{,}0\,000\,632\,t^3 - Cl(0{,}1161 - 0{,}003\,922\,t + 0{,}000\,063\,t^3);$$

$$N = 18{,}639 - 0{,}4304\,t + 0{,}007\,453\,t^2 - 0{,}0\,000\,549\,t^3 - Cl(0{,}2172 - 0{,}007\,187\,t + 0{,}0\,000\,952\,t^2).$$

Hiernach berechnet man, daß in Ozeanwasser von 35‰ bei 0° sich 8,03 ccm O und 14,40 ccm N, bei 25° aber nur 4,93 ccm O und 9,78 ccm N absorbiert finden. Die wirklich in Wasserproben gemessene Luft weicht nicht selten von diesen berechneten Werten ab, da durch die Lebenstätigkeit der planktonischen Pflanzen Sauerstoff zugeführt, durch die der Tiere aber verbraucht wird, und ferner bei der Langsamkeit der Diffusion der Uebergang von atmosphärischem Stickstoff aus der Atmosphäre ins Wasser und umgekehrt nicht den Temperatur- und Luftdruckänderungen sogleich folgt. Außerdem ist eine Abscheidung von Stickstoff aus Nitriten oder Nitraten des Seewassers durch die Tätigkeit von Bakterien sehr wahrscheinlich. Neuere Untersuchungen des Sauerstoffgehalts namentlich von W. Brennecke auf S. M. S. „Planet“ lassen erkennen, daß auch in den tieferen Regionen der tropischen Ozeane nur ein kleines Defizit an Sauerstoff vorhanden, diese Wassermasse also aus den Oberflächenschichten hoher Breiten herzuleiten ist. In den mittleren Schichten (400 bis 600, auch 1000 m) dagegen wurde ein stärkeres Defizit in der Aequatorialregion nachgewiesen, was darauf hindeutet, daß das durch den Atmungsprozeß der Planktontiere verbrauchte Quantum von Sauerstoff nicht durch Zuführung von solchem Wasser ersetzt wird, das kürzlich mit der Atmosphäre in Berührung war. Diese Tatsachen werfen ein deutliches Licht auf die Intensität und Richtung unterseeischer Strombewegungen.

Komplizierter ist das Verhalten der im Meerwasser absorbierten Kohlensäure und auch der theoretischen Spekulation schwer zugänglich. Denn es kann zunächst keinem Zweifel unterliegen, daß die Kohlensäure der Atmosphäre nicht die einzige Quelle der im Seewasser absorbierten ist, sondern daß magmatische Zufuhren durch unterseeische Vulkane stetig stattgefunden haben und noch heute andauern, und ferner daß der Atmungsprozeß der Planktonorganismen ebenfalls ihren Bestand verändert. Vor allem aber unterscheidet sich die Kohlensäure von den anderen in Lösung gehenden Gasen dadurch, daß sie nicht einer bloßen physikalischen Absorption unterworfen ist, sondern gewisse chemische Bindungen eingeht, die das aufgenommene Gas festhalten und es nur bei sehr hoher Temperatur und im Vakuum wieder frei geben. Aus einem Liter Nordseewasser können so 50,9 ccm CO_2 erhalten werden, während gemäß dem geringen Absorptionskoeffizienten davon nur ein ganz kleiner Bruchteil (bei 0° etwa 0,5 ccm) als freies Gas gelöst sein kann. Da das Seewasser eine, wenn auch schwache, alkalische Reaktion aufweist, ist ebenfalls zu schließen, daß nennenswerte Mengen freier Kohlensäure nicht vorhanden sind. Nach Tornöe definiert man dieses Säuresättigungsvermögen als Alkalinität und drückt diese durch die Menge Kohlensäure aus, die erforderlich ist, die überschießenden Basen in normales Karbonat zu verwandeln; nordatlantisches Wasser der Irmingersee südwestlich von Island hat danach eine Alkalinität von 26,86 ccm (bei einem Totalgehalt an CO_2 von 49,07 ccm). Eine neuere Definition von W. Ringer versteht unter Alkalinität die Konzentration des Hydroxylions OH; beide Werte lassen sich aber durch einen Faktor ineinander umrechnen. In den Ozeanen ist nach Ruppin die Alkalinität überall kleiner, als die Gesamtkohlensäure, aber größer als die Hälfte davon, d. h. die Kohlensäure ist nicht ausreichend, um allen Kalk als Bikarbonat zu binden, aber erheblich mehr, als dem neutralen Salz entspricht. Auch in der Nordsee ist das der Fall, in den Tiefenschichten der Ostsee dagegen ist häufig mehr CO_2 vorhanden, zugleich mit einem starken Fehlbetrag an O, was auf animalischer Atmung beruhen kann. Während sonst im großen und ganzen die Alkalinität dem Salzgehalt proportional ist (nach Hamberg $A = 0{,}7675\,S$), ist die Ostsee entlang den deutschen Küsten, insbesondere im Bereich der Flußmündungen, reicher und stellenweise von höherer Alkalinität als der Ozean, was mit dem Reichtum der norddeutschen Flüsse an kohlensaurem Kalk zusammenhängt. An der schwedischen Seite fehlt dieser Ueberschuß.

4d) Die Temperaturverhältnisse. Die geringe Wärmekapazität des Seewassers bringt es mit sich, daß im offenen Ozean der Unterschied zwischen höchster und niedrigster Temperatur in der täglichen Periode nur 0,5° bis 0,6° beträgt. In der Nacht ist dabei das Wasser beträchtlich wärmer (fast 1°) als die darüber liegende Luft, bei Tage nur wenig kälter (0,5°), so daß im allgemeinen die Meeresoberfläche wärmer ist als die Luft, wenn auch nur etwa um 0,3°; hierbei ist von den besonderen Fällen abgesehen, wie bei Meeresströmungen tropischer Herkunft in hohen Breiten, wo der Ueberschuß 1° bis 1,5° betragen kann, oder bei Regionen aufsteigenden Tiefenwassers, das seine niedrigen Temperaturen mitbringt und kälter als die Luft ist. Die tägliche Temperaturperiode dringt nur wenig tief ins Wasser ein, doch tiefer als in Süßwasserseen, da an der Meeresoberfläche durch die besonders bei Tage gesteigerte Verdunstung die Wasserteilchen schwerer werden und beim Absinken in die Tiefen ihre Wärme mitnehmen. Im Mittelmeer hat man diese Wirkung bis 70 m hin deutlich verfolgen können. Während in den deutschen Süßwasserseen im Sommer diese Erwärmungsvorgänge in Gestalt der sogenannten Sprungschicht in etwa 11 bis 13 m Tiefe ihre untere Grenze erkennen lassen, verlegt sich diese darum in den Ozeanen in ein tieferes Niveau. In der Ostsee ist im Hochsommer die Sprungschicht erst in 40 m Tiefe am unteren Rande der homohalinen Deckschicht gefunden, in ruhigen Tropenmeeren hat man einen stärkeren Temperaturabfall erst in 110 bis 120 m Tiefe wahrgenommen. Sonst sind Strömungen und Wellenbewegungen tätig, solche schärfere thermische Schichtungen im Ozean zu verwischen.

Die jährliche Temperaturschwankung, ausgedrückt durch die Differenz des höchsten und niedrigsten Monatsmittels, bleibt auf $\frac{3}{4}$ der ganzen Meeresoberfläche unter 5°, auf $\frac{1}{4}$ unter 2°, wobei hauptsächlich die Tropenzone beteiligt ist, obwohl auch gegen die höchsten Breiten beider Hemisphären hin diese Jahresamplitude wieder abnimmt. Die größeren Schwankungen liegen in mittleren Breiten da, wo die Meeresströme aus tropischem und polarem Wasser einander begegnen und ihre Grenzen gegeneinander verschieben, wie z. B. südlich von Neufundland oder östlich von Japan. Ebenso haben die abgeschlossenen Teile der Nebenmeere höherer Breiten starke jährliche Schwankungen; so schon in den nördlichen Teilen des Mittelmeers bis 14°, in der Ostsee bis 17°, im Innern des Gelben Meers bis 27°. Für die Tiefe, bis zu welcher die jährliche Temperaturschwankung im landfernen Ozean eindringt, liegen ausreichende Beobachtungen noch nicht vor. Doch läßt sich aus dem Verhalten des östlichen Mittelmeerbeckens im Hochsommer schließen, daß diese Tiefe dort mehr als 400 m betragen kann, denn am Ende des Winters scheint die ganze Wassersäule von der Oberfläche bis zum Boden hin gleich warm (homotherm) mit überall 13,7°. — Am höchsten sind im offenen Ozean die Oberflächentemperaturen im Monat Mai auf einem großen Gebiet im Indischen und Pazifischen Ozean von 60° O. L. bis 160° W. L. (von Sokotora bis Paumotu) zu beiden Seiten des Aequators mit rund 29°. Eine Oberflächentemperatur von 30° wird dabei nur in der Nähe der hinterindischen Küsten und im westpazifischen Ozean überschritten, wo bis zu 32° vorkommen; am wärmsten können die nördlichen Teile des Persischen Golfes (35,6°) und Roten Meers (34,3°) werden.

Die normale Temperaturschichtung im offenen Ozean ist anotherm, d. h. die Temperaturen nehmen von der Oberfläche nach dem Boden hin stetig ab, dabei in den obersten Schichten rascher (besonders in der Sprungschicht), dann langsamer, und schon in mehr als 2000 m Tiefe sind auch in den Tropen höhere Werte als 3° selten. Entwirft man Isothermkarten für Tiefen von 200 m, so zeigt sich schon ein beträchtlicher Unterschied gegen die Anordnung an der Oberfläche; in allen drei Ozeanen sind dann die höchsten Temperaturen (von mehr als 15° bis 20°) nicht mehr in der Nähe des Aequators (hier meist nur 12° und weniger) sondern in beiden Hemisphären an die Westseite der Passatzonen verschoben, wo dann an den Wendekreisen 6° bis 7° mehr gefunden werden als am Aequator. Dieser Typus steigert sich in 400 m, so daß am Aequator 8° bis 9° im Atlantischen und Pazifischen Ozean, dagegen über 14° bei den Bonin- und Fidjiinseln, östlich von Arabien und von Madagaskar und im Südatlantischen Ozean bei fast 30° S. B., über 16° in der nordatlantischen Sargassosee auftreten. In größeren Tiefen gleichen sich diese Unterschiede, ausgenommen im Nordatlantischen Ozean, wie bei Darstellung der Strömungen näher auszuführen, bald aus und in 3000 m Tiefe bewegen sich die örtlichen Unterschiede zwischen den Temperaturen von 2° und 3°. In noch größeren Tiefen machen sich die unterseeischen Bodenschwellen als deutliche Wasserscheiden bemerkbar, wobei die großen Tiefenbecken jeweils von ziemlich gleichmäßig temperiertem, aber kaltem Wasser erfüllt erscheinen. Im großen Nordpazifischen Becken sind es 1,6° bis 1,7°, in den Tonga- und Kermadecgräben auch bis über 9000 m 1,1° (wobei die Instrumentalfehler $\pm 0,5°$ bei älteren Messungen übersteigen können), im chilenisch-peruanischen Becken meist 1,8°, im pazifisch-

antarktischen 0,9° bis 1,3°. Der östliche Indische Ozean hat südlich und westlich von Australien Bodentemperaturen etwas unter 1°, im übrigen tropischen Anteil zwischen 1° und 2°, im Sundagraben in 7000 m Tiefe 1,0° bis 1,2°. Südlich von dem Kerguelenrücken ist dann das große indisch-antarktische Becken am Boden in 5000 m Tiefe mit Wasser von unter 0° bis — 0,5° erfüllt, während am Boden der Kapmulde und im Argentinischen Becken schon über 0° bis 0,7°, ebensoviel auch noch im Brasilianischen Becken gemeldet werden. Im Gegensatz dazu ist der östlich von der atlantischen Mittelschwelle und nördlich von dem Walfischrücken gelegene Teil des atlantischen Bodens von wärmerem Wasser mit 2,2° bis 2,6° bedeckt, wie es sich auch nördlich vom Aequator bis in den Biscayagolf hinauf findet. Dagegen hat das westlich von der Schwelle gelegene nordamerikanische Becken wieder 1,5° Bodentemperatur, was darauf hinweist, daß aus dem Brasilianischen Becken kein kälteres Bodenwasser Zutritt findet.

Anders pflegt die Schichtung in den hohen Breiten der Ozeane und namentlich in den Nebenmeeren zu sein, wo die verschiedenen übereinander liegenden Wasserschichten durch stark abweichenden Salzgehalt den Erwärmungs- und Abkühlungsvorgängen von der Oberfläche her schwer folgen und seitliche Strombewegungen von Einfluß werden. Am südlichen Polarkreise haben wir so an der Oberfläche dünnes Schmelzwasser von niedriger, dem Gefrierpunkt naher Temperatur (— 1,0° bis — 1,8°); nach unten hin wird das Wasser mit steigendem Salzgehalt wärmer, überschreitet von 150 bis 200 m abwärts 0°, bis dann von einem Maximum in 300 bis 500 m, das zwischen 0,8° und 1,9° aufweisen kann, die Temperatur wieder langsam abnimmt, um in mehr als 1500 m unter 0° zu sinken. Dieser m e s o t h e r m e Typus wird uns bei Darstellung der Meeresströmungen wieder beschäftigen, da er sich ganz analog auch in den hohen Nordbreiten wieder findet, nur mit dem Unterschiede, daß die mittleren Schichten bis zu einem Maximum von 3° bis 4°, die Bodenschichten auf 1,4° bis 1,5° erwärmt sind.

Die großen Mittelmeerbecken, die durch verhältnismäßig seichte Randschwellen vom Ozean abgeschieden sind, folgen zwei verschiedenen Typen; der eine, für die höheren Breiten meist maßgebend, zeigt die Tiefen erfüllt von der niedrigsten Temperatur, die in der kältesten Jahreszeit an der Oberfläche auftreten kann, vorausgesetzt, daß keine schwachsalzige Deckschicht das Absinken dieser winterlich ausgekälteten Wasser unmöglich macht. Hierzu gehört die Tiefenmulde des europäischen Nordmeeres westlich von Norwegen, die von 1000 m abwärts bis 3000 m homothermes Wasser von — 1,3° und von 34,9‰ Salzgehalt birgt und es von der Oberfläche im Februar nordöstlich von Jan Mayen jährlich zu erneuern scheint. Demselben Typus gehören die großen Tiefenbecken des Mittelländischen Meeres an, das im Sommer eine anotherme, am Ende des Winters eine homotherme Anordnung zeigt, wobei im östlichen Teil und im Jonischen Meer 13,85°, im Tyrrhenischen 13,2°, im Balearischen Becken fast 13° bis 4000 m und mehr herrschen. Ebenso ist es im Roten Meer, das von 21,5° warmem Wasser von 700 bis 2200 m Tiefe hin erfüllt ist. — Ein zweiter Typ besitzt Zugangstiefen vom Ozean her, die den unteren Schichten niedrigere Temperaturen zuführen, als der kältesten Zeit der Oberfläche zukäme; hierfür sind sehr viele Beispiele bekannt. U. a. weist das Karibische Meer von 1700 m bis 6290 m gleichmäßig 4,2° auf, die Chinasee von 1600 m abwärts 2,5°, die Sulusee von 700 m abwärts bis 5000 m 10,3°, die Celebessee von 1500 m abwärts 3,7°, die Bandasee von 1650 m bis 6500 m 3,3°; auch das zentrale Polarbecken nördlich von Franz Josefsland hat von 800 m Tiefe abwärts — 0,8° bis 3800 m hin, ist also wärmer, als das europäische Nordmeer und von diesem durch eine Schwelle mit 800 m Satteltiefe nordwestlich von Spitzbergen getrennt.

Die verwickelteren Vorgänge in den heimischen Meeren sind durch die internationale Erforschung derselben in den letzten Jahren näher bekannt geworden, wobei die Beobachtungen der vier Terminmonate Februar, Mai, August und November hauptsächlich maßgebend sind

Die seichteren Teile der Nordsee südlich von der Doggerbank sind durch Sturmwellen und Gezeitenströme so durcheinander gemischt, daß eine gleichmäßige Temperatur (und Salinität) in allen Jahreszeiten von der Oberfläche bis zum Boden hin die Regel bildet. Nur nach einer Reihe ganz ruhiger Tage tritt in der warmen Jahreszeit eine stärkere Erwärmung der oberen Schichten, im Winter aber eine solche der unteren (also Katothermie) auf, wobei dann der Salzgehalt nach der Tiefe hin ein wenig gesteigert ist. Nördlich von der Doggerbank ist auch Homothermie im Winter zu finden, namentlich nach andauernden starken Stürmen, wobei die ganze Wassersäule bis über 100 m Tiefe hin im Februar zwischen 6,5° und 8°, in einzelnen Jahren verschieden, temperiert ist. In der wärmeren Jahreszeit hält sich diese Winterschicht in Tiefen von mehr als 40 bis 50 m unverändert und die Oberfläche erwärmt sich dann bis 13° und 15°. In der tieferen norwegischen Rinne und im Skagerrak ist in allen Jahreszeiten eine stärkere Schichtung erkennbar. An der norwegischen und schwedischen Seite liegt der im Winter schwächer, im Sommer kräftiger entfaltete Ausfluß des salzärmeren Ostseewassers (der Baltische Strom), während die größeren Tiefen von 150 bis 600 m abwärts von unregelmäßig schubweise aus dem Nordmeer her ergänztem stärker gesalzenem

Wasser eingenommen sind, das sich mehr am Südrande der Rinne nach Osten zu bewegen scheint. Im Winter sind dann die intermediären Schichten ein wenig wärmer als die tiefsten und um 2° bis 3° wärmer als die Oberfläche, während im Sommer die oberen Schichten bis 10 oder 15 m hin am wärmsten sind. Doch sind diese jahreszeitlichen Schwankungen im landnahen Randgebiet immer größer als in der Mitte, so daß das Skagerrak in dieser während des Sommers kälter, im Winter wärmer ist als an den Rändern in den gleichen Tiefenniveaus.

Wenn hierbei die wechselnden Windrichtungen schon von größtem Einfluß sind, so ist das noch mehr der Fall in der Ostsee, insbesondere in ihren westlichsten Teilen. In diesen können andauernde Stürme den Temperaturunterschied der oberen und Bodenschichten fast völlig verwischen. In der Regel aber macht sich die ausgeprägte Salzgehaltschichtung entscheidend bemerkbar, indem ein salzarmer Oberflächenstrom aus der Ostsee hinaus, ein salzreicher Unterstrom in die Ostsee hinein strebt. Während überall an der Oberfläche im Februar die niedrigste, im August die höchste Temperatur auftritt, ist in den Tiefen ein deutlicher Phasenverzug die Regel. Im Kattegat nördlich von Läsö liegt die Oberflächentemperatur in den vier Terminmonaten Februar, Mai, August, November der Reihe nach bei 2,8°, 6,4°, 16,0° und 8,7°, in 100 m Tiefe aber finden sich gleichzeitig 4,7°, 5,0°, 7,3° und 8,9°, so daß der Unterstrom aus dem Skagerrak im November seinen höchsten Wärmevorrat aufweist. Aehnliches erweisen zwei Reihen aus der Mitte des großen Belts, nämlich für die Oberfläche 1,8°, 6,9°, 16,9°, 8,9° und für 60 m Tiefe 3,7°, 4,7°, 8,2° und 11,0°; das Wasser des Unterstroms stammt hier aus der Mitte des Kattegat. In der westlichen Ostsee ist der Phasenverzug nicht so groß, da die Durchmischung bei den geringen Wassertiefen größer wird. Nur im Sommer kommt es zu einer ausgeprägten Schichtung im Arkonabecken: hier kann die Oberfläche bis über 20° steigen, während die tieferen Schichten nur noch unter 6° bleiben, wobei der Unterstrom am Boden wärmer zu sein pflegt (bis 15°), als die intermediären Schichten. Diese für die sommerliche Ostsee bezeichnende, sogenannte dichotherme Schichtung ist in dem offenen Gebiet zwischen Bornholm und den finnischen Schären am deutlichsten ausgeprägt. Man findet dann eine aus gleichsalzigem Wasser bestehende (homohaline) Deckschicht von 30 bis 50 m Mächtigkeit, in deren oberer Hälfte an der deutschen und russischen Seite die Temperaturen bis 18°, an der schwedischen selten über 15° steigen können, darunter liegt zwischen 55 und 85 m eine relativ kalte Schicht mit nur 2° bis 3° und nimmt dann die Temperatur langsam mit der Tiefe in der Unterschicht bis zum Boden hin mit 3° bis 4° wieder zu. Diese Dichothermie zieht sich im Sommer auch in den Finnischen und Bottnischen Golf hinein, wobei die kälteste Zwischenschicht Temperaturen von wenig über 0° haben kann und ihre Entstehung durch die winterliche Auskühlung der Oberfläche deutlich erkennbar wird. Im Winter ist eine katotherme Anordnung die Regel, wobei die Oberfläche bis nahe an oder auch unter die Gefriertemperatur abgekühlt wird. Die homohaline Deckschicht kann dann auch homotherm mit 0° bis 1° oder weniger werden, wenn stürmisches Wetter das Wasser durchmischt.

Als Ganzes genommen ist die ozeanische Decke der Erde mit einer rechnungsmäßigen Mitteltemperatur von 3,8° für die Meeresorganismen ein kalter Lebensraum. Nur die obersten von der Sonnenwärme wie vom Sonnenlicht durchstrahlten Schichten zeigen örtliche Differenzierungen und damit den Anreiz für kräftigere und feinere Variationen des organischen Lebens, während die große übrige Wassermasse mit ihren einförmigen abyssischen Zuständen auch Eintönigkeit der Lebensentfaltung verbindet.

4e) Die Eisbildungen im Meer. sind wesentlich zweifacher Herkunft, indem das Meerwasser selbst gefriert oder vom Lande Gletschereis zugeführt wird. Flußeis, von den größeren festländischen Strömen stammend, spielt nur in beschränkten Teilen des nördlichen Eismeers eine ganz untergeordnete Rolle.

Seewasser gefriert nicht sogleich, wenn es unter seine Gefriertemperatur abgekühlt wird; erhebliche Unterkühlung ist häufig in der Natur beobachtet. Der Anreiz zur Kristallisation ist auch nicht durch Bewegung allein gegeben, sondern vielmehr müssen feste Körper auf das unterkühlte Wasser oder ein Schneefall den Anstoß geben. In seichten Meeren steigt daher häufig zuerst Grundeis auf, beladen mit festen Bodenteilen; aber auch an der Grenze einer unterkühlten gegen eine darunter liegende wärmere aber schwerere Schicht, kann die Eisbildung als sogenanntes Siggeis beginnen, indem tellerartige Stücke rasch aufsteigen und in kurzem eine Decke bilden. Gefrieren Wasserschichten in Spalten zwischen vorhandenen Treibeisschollen, so treten lang gestreckte, prismatisch oder platt ausgezogene Kristalle des hexagonalen Systems auf, die anfangs wenig Zusammenhang haben, dann sich wie Blättchen eines Farnkrauts oder einer Schneeflocke aneinanderlegen und zuletzt einen Brei bilden. Es gefriert nur das reine Wasser, die zurückbleibende Lösung wird also konzentrierter und sendet einen Diffusionsstrom nach der Tiefe zum normal gebliebenen Seewasser. Vermutlich ist diesem Diffusionsstrom zu verdanken, daß die Kristallplättchen in Seewasser stets senkrecht gegen die Gefrierfläche gestellt sind, während sie in Süßwasser parallel zu dieser Fläche liegen. Die Plättchen vereinigen sich dabei zu Bündeln, deren Glieder unter sich parallel, aber von einem Bündel zum anderen verschieden orientiert sind. Dem Meer- oder Scholleneis wird so eine faserige Struktur zuteil, weshalb die Bruchflächen der Schollen stets senkrecht zur Oberfläche liegen. Erfolgt das Gefrieren rasch, so schließen sich

die Faserbündel schon aneinander an, ehe der erwähnte Diffusionsstrom alles Salz nach der Tiefe hinwegführen kann; dann friert Salzwasser mit ein. Aus der Oberfläche der Schollen blüht es dann in der Winternacht in Gestalt von mehrere cm langen nadelartigen Kristallen wieder aus, die sich büschelförmig nebeneinander stellen (das Rassol der sibirischen Mammutsucher). Da Seewasser ein Gemenge verdünnter Salzlösungen ist, treten die einzelnen Komponenten, ähnlich wie beim Abdampfen, bei sehr verschiedenen Temperaturen in Kristallform aus. Die eutektische Temperatur ist nach W. E. Ringers Versuchen am höchsten beim kohlensauren Kalk, dann folgt das Natriumsulfat (bei — 8,2°), bei — 23° beginnt Chlornatrium auszufallen, bei — 55° das Calciumchlorid usw. — Ebenso werden beim Gefrieren auch die absorbierten Gase ausgeschieden und sammeln sich in Form von Bläschen in den Zwischenräumen zwischen den Kristallfasern an. Sobald die Eisdecke sich geschlossen hat, schreitet der Gefrierprozeß nur langsam in die Tiefe vorwärts; erfahrene Polarforscher bezeichnen es als unwahrscheinlich, daß in einem Winter stärkere Eisdecken als solche von 2 bis höchstens 2,5 m gebildet werden. Liegen Eisschollen aber im eigenen Schmelzwasser, das von sehr niedrig temperiertem Meerwasser unterlagert ist, so friert das Tauwasser an der Unterseite der Schollen und diese wachsen auch mitten im Sommer, wie Nansens Beobachtungen auf der Framfahrt ergaben. Unterstützt wird dieser Prozeß durch die eigene niedere Innentemperatur der Schollen, die den größten Teil des Jahres hindurch tief unter 0° liegt und auch im Hochsommer des Nordpolarmeeres sich nicht über — 0,1° erhebt. Stark wachsen auch die Eisschollen durch darauf abgelagerten Schnee, der namentlich im antarktischen Gebiet die Schollen bis unter das Wasser drücken kann, so daß das eindringende Seewasser mit dem Schnee zu schwammig-zelligen Eisschichten gefriert. Stürme schieben die Schollen auf- und untereinander zu sogenannten Torossen zusammen und bilden in den inneren Teilen des nördlichen Eismeeres das undurchdringliche Packeis, das aber durch die Meeresströmungen zu beiden Seiten von Grönland im Laufe der Jahre in niederere Breiten geführt und dort zum Schmelzen gebracht wird. Außer in den eigentlichen Polargebieten kommt es nur in den inneren Teilen des Beringmeers, des Ochotskischen und Japanischen Randmeers und im Golf von Liautung zu winterlichen Eisbedeckungen, die aber nur in der Gegend der Beringstraße in den Sommer hinein aushalten. Von den nordeuropäischen Meeren gefriert das norwegische Fjordgebiet bis über das Nordkap hinaus niemals, erst in den inneren Buchten der Murmanküste und im Weißen Meer bildet Wintereis sich regelmäßig; ebenso bedeckt es den Bottnischen und Finnischen Golf vom November bis Anfang Mai, während die westliche Ostsee nur unregelmäßig und für kurze Zeit von Eissperre betroffen wird. Auch im Mittelmeergebiet ist der nördlichste Teil des Schwarzen Meeres mit dem Asowschen Meer dem Gefrieren ausgesetzt, während sonst Eisbildungen nur im Golf von Salonichi, in venetianischen und dalmatinischen Buchten ganz vereinzelt auftreten.

Die Eisberge sind die in die See vorgeschobenen und durch Auftrieb abgebrochenen Zungen von Gletschern der meist von Inlandeis bedeckten höheren Polarräume. Die Fjorde Ost- und Westgrönlands, in geringerem Maße auch die Spitzbergens sind die Geburtsstätten dieser Eisberge, die durch das Schmelzwasser und ablandige Winde in die freie See hinaus geführt und dort den Meeresströmungen überliefert werden. Nach genaueren Messungen kommen Eisberge von mehr als 70 m Höhe über dem Meeresspiegel nur selten vor; da ihre Masse von Klüften und Spalten durchsetzt ist, ragen sie nicht wie nach der Dichte des homogenen Eises zu erwarten, mit $^1/_8$, sondern meist nur mit $^1/_6$ bis $^1/_4$ ihrer Masse aus dem Wasser hervor. Besonders großartig sind die Eisbergbildungen im antarktischen Gebiet, wo das Inlandeis von dem Plateau des großen den Südpol umgebenden Landes in freier Front auf das Meer hinausdrängt und riesige Tafeln von vielen qkm Fläche als schwimmende Eisinseln von seinem Saume abstößt. Diese antarktischen Gebilde zerfallen dann meist in kastenförmige Eisberge von 30 bis 50 m Höhe über dem Meere und der fünf- bis sechsfachen Tauchtiefe. Man kennt durch die Meeresströme in den Bereich der Schiffswege, namentlich östlich von den Falklandinseln, verschleppte Eisinseln von größerem Areal als die Insel Fehmarn; solche wie Helgoland sind ganz gewöhnlich. Ihr Tiefgang ist in vielen Fällen so groß, daß sie schon in der Nähe ihrer Geburtsstätte auf Schelfbänken stranden; sie werden dann von den Schneestürmen an ihrer Oberfläche abgeschliffen und bilden als Blaueis ein Merkmal derjenigen Teile der Antarktis, in denen anscheinend für Jahrzehnte alles in Ruhe verharrt. Analoge aber kleinere derartige Gebilde sind auch in den innersten Teilen des nördlichen Eismeers im Smythsund und nördlich vom Parryarchipel als Ureis (palaeocrystic ice, blue domes) gelegentlich beschrieben. Durch ihre große Masse sind die Eisberge sehr widerstandsfähig und werden sie von den Meeresströmen in niedere Breiten weithin entführt, ehe sie abschmelzen. Aus ihrem Ur-

sprungsgebiete tragen sie von Grundmoränen herstammende Geschiebe mit sich, die sie bei Veränderungen ihrer Gleichgewichtslage gelegentlich auch sichtbar werden, beim Abschmelzen aber schon unterwegs und namentlich bei Berührung mit wärmeren Meeresströmen fallen lassen. Der Meeresboden im Verbreitungsbereich dieser Eisberge führenden Strömungen ist darum mit Geschieben jeder Größe, darunter oft solchen von beträchtlichem Gewicht, bestreut.

5. Die Meereswellen. Von den rhythmischen Schwingungsformen, die bei Gleichgewichtsstörungen der Flüssigkeiten auftreten, finden sich im Meere vorzugsweise die transversalen Wellen, bei denen die einzelnen Wasserteilchen kreisende Bewegungen in einer Ebene ausführen, die in der Richtung gelegen ist, nach welcher die Welle fortschreitet; solche Wellen bilden örtlich Hebungen und Senkungen der Meeresoberfläche. Die longitudinalen Wellen, bei denen die Wasserteilchen vermöge ihrer Elastizität nur geradlinig in der Fortpflanzungsrichtung hin und zurück schwingen, treten nur als Schallwellen und bei submarinen Erdstößen auf; in beiden Fällen pflanzen sich die Stöße mit der gleichen großen Geschwindigkeit (1440 m. p. S.) durch das Wasser fort, ohne daß die Oberfläche ihre Gestalt verändert, doch sind die Erschütterungen von Schiffen, die ein solcher Erdbebenstoß traf, in einzelnen Fällen so stark gewesen, daß ein schweres Leck entstand. Unter den transversalen Wellen sind folgende zu unterscheiden:

5a) *Die Windwellen.* Diese entstehen unter der Einwirkung des Windes als kleine kapillare Kräuselung der Wasseroberfläche. Nach *Helmholtz* wird die Grenzfläche zwischen einer ruhenden und einer zweiten, darüber hinströmenden Flüssigkeit instabil, da in dieser die oberen Schichten rascher bewegt werden, als die durch Reibung an der unbewegten Unterlage haftenden untersten Schichten und die oberen Schichten gewissermaßen aufsaugend auf die Unterlage einwirken. Um die Druckstörung auszugleichen, hebt sich ein Teil der Wasseroberfläche, und um die dazu erforderliche Portion Wasser zu liefern, muß die Oberfläche an einer anderen Stelle sinken. Die Abstände dieser gehobenen und gesenkten Partien, also die Wellenlängen, sind abhängig von der Dichtigkeit der Luft ϱ und des Wassers σ und von der Windgeschwindigkeit w nach der Formel

$$\lambda = \frac{2\pi}{g} \cdot \frac{\sigma\,\varrho}{\sigma^2 - \varrho^2} \cdot w^2$$

wo g die Fallbeschleunigung bedeutet. Hiernach entstehen auch bei Sturm (w = 15 m p. s) mit $\sigma = 1{,}023$ $\varrho = 0{,}0012$ nur primäre Wellen von 17 bis 18 cm Länge. Diese entwickeln sich aber durch Schwebungen und Interferenzen einerseits, durch den einseitigen Druck des Windes auf die von ihm getroffenen Wellenhänge andererseits zu immer größeren Längen und Höhen. Zur Entwickelung großer Wellen gehört nicht nur ein andauernder und starker Wind, sondern tiefes Wasser und großer freier Seeraum. Die größten Wellen werden daher im offenen Ozean angetroffen; man hat Höhen (als senkrechten Abstand des tiefsten Punktes des Wellentals vom höchsten des Wellenkammes) von 15 m sicher, wenn auch nur vereinzelt gemessen, doch sind solche von über 8 m schon selten. Die Wellenlängen schwanken vom 10 bis 100 fachen der Wellenhöhen und dementsprechend sind die Schwingungsperioden verschieden. Nach der herrschenden Trochoidentheorie, wonach das Wellenprofil eine Trochoide ist, bestehen zwischen der Wellenlänge λ, der Periode τ und der fortschreitenden sekundlichen Geschwindigkeit c bei Wellen in tiefem Wasser die Beziehungen:

$$\tau = \sqrt{\frac{2\pi}{g}\,\lambda} = \frac{2\pi}{g}\,c$$

so daß, wenn eines dieser Maße bekannt ist, die anderen beiden berechnet werden können. Am leichtesten zu beobachten ist die Wellenperiode, und zahlreiche vergleichende Messungen auch der anderen Dimensionen haben ergeben, daß diese Trochoidenformeln wenigstens angenähert brauchbare Werte liefern. Die Bahnen, welche die Wasserteilchen in der Welle durchlaufen, sind in tiefem Wasser kreisförmig; an der Oberfläche ist der Halbmesser r dieses Kreises gleich der halben Wellenhöhe h, nimmt aber rasch nach den tieferen Schichten ab gemäß der Formel $r = h\,e^{-\frac{2\pi z}{\lambda}}$, wo e die Basis der natürlichen Logarithmen und z den Abstand von der Oberfläche bedeutet. Nach *Rankine* erhält man genau genug den ganzen Durchmesser dieser Orbitalbahnen, indem, wenn die Tiefe z in Neunteln der Wellenlänge ausgedrückt wird, man für jedes zukommende solche Neuntel den Durchmesser (2 r) je um die Hälfte abnehmen läßt: er ist also in einer Tiefe gleich $^1/_9\,\lambda$ nur halb so groß, in $^3/_9\,\lambda$ nur $^1/_8$, in $^8/_9\,\lambda$ nur $^1/_{256}$ der Wellenhöhe. Die totale Energie aller Teilchen von der Oberfläche abwärts bis zu einer Tiefe, wo die Orbitalbewegung unendlich klein wird, ist gegeben durch

$$E = \frac{1}{8}\, m\,\lambda\,H^2 \left\{ 1 - \frac{\pi^2}{2} \cdot \frac{H^2}{\lambda^2} \right\}$$

wo H die ganze Wellenhöhe und m das Gewicht eines Kubikmeters Wasser in kg bedeutet; in den meisten Fällen wird der Ausdruck in der Klammer vernachlässigt werden

können, da $H:\lambda$ höchstens 1 : 10 ist. — Ist die ganze Wassertiefe p kleiner als die Wellenlänge λ, so ändert sich die Form der Orbitalbahnen zu ellipsenähnlichen Kurven, deren große horizontale Achse nach den tieferen Schichten hin nur wenig abnimmt, was für die kleine vertikale um so rascher erfolgt, die am Boden null wird. In seichtem Wasser von der Tiefe p wird die Wellengeschwindigkeit $c = \sqrt{g\,p}$. — Die Orbitalgeschwindigkeit der Wasserteilchen ist immer geringer als die fortschreitende Geschwindigkeit der ganzen Welle; sie folgt für tiefes Wasser der Formel $v = 2\pi\,c.h/\lambda$, dagegen in seichtem Wasser $= c.h/p$, wo h die halbe Wellenhöhe bedeutet. Es scheint, als wenn bei einer bestimmten Windstärke (in großem Seeraum) gewisse maximale Wellenhöhen nicht überschritten werden; dauert der Wind mit gleicher Stärke fort, so wird seine Energie gemäß der obigen Formel für $E = {}^1/_8\,m\,\lambda\,H^2$ dazu dienen, die Wellenlänge wachsen zu lassen. Daher sind jung aufgeworfene Wellen von verhältnismäßig steilem Profil ($H:\lambda$ wie ${}^1/_{15}$ bis ${}^1/_{10}$), während ältere Wellen mit größerer Länge und damit notwendig auch größerer Periode und Geschwindigkeit auftreten. Flaut der Wind ab, so sinkt die Wellenhöhe sogleich, während die λ, τ und c noch weiter wachsen, da die aufgespeicherte Energie sich bei der geringen inneren Reibung des Wassers nicht so rasch verzehrt. Es entstehen dann lange Wellen von rundlichen Kämmen, die als Dünung weit aus ihrem Ursprungsgebiet hinauslaufen und ganze Ozeane überqueren können; so ist im Winter aus der Gegend der Neufundlandbank her stammende Dünung nicht nur an den europäischen Küsten, sondern im ganzen atlantischen Tropengebiet über den Aequator hinaus bis nach Ascension und St. Helena häufig beobachtet. Die Periode wächst von ursprünglich 6 bis 8 Sekunden auf 15, ja über 20 Sekunden an, und dementsprechend erlangen die Geschwindigkeiten statt der anfänglichen 30 bis 40 km in der Stunde Werte von über 80, ja über 120 km, wie die schnellsten Eisenbahnzüge.

5b) Die Explosions- und Dislokationswogen. Wellen von ganz besonderer Energie entstehen durch vulkanische Explosionen am Meeresboden und durch unterseeische Bergschlipfe, wie sie infolge von Erdbeben an den steilen Gehängen der Kontinente, namentlich gegen die abyssischen Gräben hin, auftreten können. Deutliche Fälle der ersten Art sind außerordentlich selten beobachtet; es wird eigentlich nur die Explosion des Krakatau in der Sundastraße am 26. August 1883 als Beispiel aufgeführt, nicht ohne daß auch eine andere Deutung Anklang gefunden hätte, wonach es nicht die explodierenden Gase, sondern die dabei in die Luft geschleuderten Gesteinsmassen der Vulkaninsel gewesen seien, durch deren Niederstürzen in die See gewaltige Wogen aufgeworfen wurden. Die von unterseeischen Bergschlipfen erregten Wellen gehören dem Typus der Seichtwasserwellen an, da ihre Länge viele Male größer als die Wassertiefe ist, durch die sie sich also mit der Geschwindigkeit der Gezeitenwogen hin bewegen; auch ihre Perioden sind sehr groß und liegen zwischen ${}^1/_4$ Stunde bis 1, ja 2 Stunden. Nur die Wellenhöhen sind im offenen Ozean nicht so groß, daß die Schiffe sie irgendwie empfunden hätten, und sie werden erst beim Aufbranden auf die Küsten zu furchtbaren Höhen aufgestaut; in der Nähe ihres Ursprunggebiets können sie 20 m erreichen und in den Häfen alles zerstören, Schiffe weit ins Land schleudern und die ganze Ufergestaltung umformen. Diese Dislokationswogen sind seit dem Altertum aus den griechischen Gewässern wohl bekannt; nirgends sind sie häufiger als an den ozeanischen Küsten Japans, wo das Volk sie mit dem besonderen Namen Tsunami bezeichnet. Von der Landseite des über 8000 m tiefen Japangrabens ausgehend haben sie nicht nur zerstörend auf die benachbarte Küste gewirkt, sondern sind über den ganzen Pazifischen Ozean hinüber gerollt und von den Flutpegeln in kalifornischen, südamerikanischen und australischen Häfen aufgezeichnet worden. Ebenso sind umgekehrt bei den Erdbeben von Arica (13. August 1868) und Iquique (9. Mai 1877) vom Atakamagraben ausgegangene Wogen nach Australien, Kalifornien und Japan gelaufen; in Hakodate gelangten sie nach einer Reisedauer von 25 Stunden an, und in Hawaii und Neuseeland brachten sie kleine Fahrzeuge zum Scheitern. Die Wogen der Krakatau-Explosion wurden an allen Küsten des Indischen Ozeans wahrgenommen und liefen auch durch den Atlantischen nach Norden hinauf, wo ihre letzten Spuren von den Gezeitenpegeln im Englischen Kanal verzeichnet wurden, nachdem sie eine Strecke gleich dem halben Erdumfang in $32^1/_2$ Stunden durchmessen hatten.

5c) Die stehenden Wellen. In abgeschlossenen kleineren Wasserbecken entstehen gleichzeitige Schwingungen der ganzen Wassermasse in der Weise, daß die Wellenberge nicht durch das Becken hin fortschreiten, sondern sich an derselben Stelle in Täler, die Täler in Berge verwandeln, während in jedem Becken in der Mitte oder auch an zahlreichen symmetrisch dazu gelegenen Linien die Oberfläche ganz ruhig bleibt; das sind die Knoten, zwischen denen die Bäuche auf- und abschwingen. Statt der kreisenden Bewegung der fortschreitenden Wellen durchlaufen die schwingenden Wasserteilchen die gleiche Bahn hin und zurück,

wobei in der Tiefe unter den Knoten die horizontale Verschiebung, im Bereiche der Bäuche die vertikale ein Maximum wird. Je nachdem sich das Becken in zwei oder mehr schwingende Teile zerlegt, unterscheidet man einknotige und mehrknotige Wellen, ihre Länge soll dabei stets einen aliquoten Teil der Länge des Gefäßes bilden, wenn dieses eine regelmäßige Gestalt hat. Nach Merian ist dann die ganze Schwingungsperiode t abhängig von der Länge l und der Tiefe p des Beckens nach der Formel

$$t^2 = \frac{4\pi l}{g} \cot \text{hyp} \frac{\pi p}{l}$$

oder angenähert $t = \frac{2l}{\sqrt{g\,p}} \left\{1 + {}^1/_4 \left(\pi \frac{p^2}{l}\right)\right\}$

Wird p/l ein kleiner Bruch, so fällt der Ausdruck in der Klammer weg. Bei einer zweiknotigen Schwingung wird die Periode halb so groß, bei einer n-knotigen $^1/_n$ t. Bei unregelmäßig gestalteten Becken wird die Lage der Knotenlinien verschoben; so rückt sie von den seichteren Enden näher an die tiefere Mitte hin. Nach den Untersuchungen von Chrystal und Endrös wird die Periode in Becken von parabolisch-konkavem Querschnitt $t = 0{,}709 \frac{1}{\sqrt{h}}$, wo h die maximale Tiefe, bei parabolisch-konvexem Querschnitt $t = 0{,}603 \frac{1}{\sqrt{h'}}$, wo h′ die kleinste Tiefe in der Mitte bedeutet. Auch einseitig offene Wasserbecken können, analog den akustischen Luftschwingungen in offenen Röhren, stehende Wellen bilden: ihre Periode ist dann die doppelte wie vorher, also $t = \frac{4\,l}{\sqrt{g\,p}}$ und verlängert sich mit der Breite der Mündung nach einem komplizierten Gesetz: ist das Verhältnis der Mündungsbreite b zur Beckenlänge l = 0.05, so wächst die Periode um 6%, für $^b/_l$ = 0,1 um $^1/_9$, für $^b/_l$ = 0,2 um $^1/_6$ und für $^b/_l$ = 0,3 um $^1/_5$, $^b/_l$ = 0,5 um 26,2% usw. Wie bei den Schallwellen treten neben der Hauptschwingung noch kürzere Oberschwingungen auf, deren Perioden nur bei ganz regelmäßig geformten Becken ganze Bruchteile der Hauptperiode sind; dagegen wird in einem parabolisch konkaven Becken z. B. bei einer vierknotigen Schwingung die Periode nicht $^1/_4$ t, sondern 0,316 t. Stehende Wellen sind in allen Binnenseen eine ganz regelmäßige Erscheinung (als Seiches am Genfer See am frühesten erforscht), aber auch in allen abgeschlossenen Teilen von Nebenmeeren in den letzten Jahren aufgefunden, so daß man sagen kann, daß jede Hafenbucht periodische Schwingungen ausführt (so die Kieler Föhrde mit einer Periode von 114 Minuten). Als Ursachen kommen wesentlich meteorologische in Betracht, Gewitterböen und sonstige starke Windstöße. Unter Umständen können diese Schwingungen so heftig werden, daß sie die in der Nähe des Strandes verankerten Seeschiffe oder die auf den Strand gezogenen Fischerboote gefährden. An den Ostseeküsten gehört dazu der sogenannte Seebär (bär = Bare, Welle), in Plymouth der Boar, den nordspanischen Häfen die Resaca, in den westsizilischen das Marrubbio, in den japanischen die Yota. So sind von F. A. Forel zuerst auch die rätselhaften Wechselströme des Euripus als auf stehenden Schwingungen der Buchten von Talanti und Eretria zwischen Euböa und dem griechischen Festland beruhend erklärt worden, indem sie zur Zeit der Nippfluten stärker werden als die Gezeitenwellen.

5d) Interne Wellen. Wie zwischen Luft und Wasser durch eine Strombewegung des einen Teiles eine Gleichgewichtstörung der Grenzfläche Wellen entstehen läßt, so können auch innerhalb ausgeprägt geschichteter Wassermassen unter ähnlichen Bedingungen an den Schichtflächen selbst Wellen auftreten, die man als interne Wellen (auch als submarine) bezeichnet. Ihre Höhe und Länge an den Grenzflächen pflegt sehr bedeutend zu sein, während an der Oberfläche kaum Störungen wahrnehmbar sind; die Geschwindigkeit, mit der interne Wellen durch das Wasser schreiten, ist aber stets sehr gering. Ist die Höhe der internen Welle H, die der damit zusammenhängenden gleich langen Oberflächenwelle h, die Dichtigkeit der schwereren Wasserschicht σ_1, die der leichteren σ, die Tiefe der leichteren Schicht = z, die Wellenlänge λ, so besteht die Beziehung

$$\frac{h}{H} = \frac{\sigma_1 - \sigma}{\sigma} \cdot e^{-\frac{2\pi p}{\lambda}}$$

Ist die obere Schicht wenig mächtig, so daß wie gewöhnlich $^p/_\lambda$ ein sehr kleiner Bruch ist, kann der Exponentialausdruck = 1 gesetzt werden. Da im Meer die Differenz $\sigma_1 - \sigma$ kaum je mehr als 0.03 erreicht, müssen die Oberflächenwellen stets klein bleiben. Auch die Geschwindigkeit c ist unter der meist zutreffenden Bedingung, daß die obere Schicht gegen die untere seicht ist, durch die einfache Formel auszudrücken $c^2 = \frac{\sigma_1 - \sigma}{\sigma} . gp$, sie ist also nur ein kleiner Bruchteil der Wellen in seichtem Wasser von der Tiefe p (wo $c^2 = gp$). Interne Wellen sind in den ausgeprägt geschichteten Meeren der höheren Breiten eine anscheinend häufige Erscheinung, deren Eigenschaften aber erst in der neuesten Zeit studiert worden sind. Ihre Perioden erreichen viele Stunden, oft nahe 12 oder 24 Stunden, so daß sie sich mit den Gezeitenwellen verwechseln lassen, und eine Ge-

schwindigkeit von oft nur 1 oder 2 m. p. s., dabei Höhen, die die interne Grenzfläche um 10, ja 50 m auf und abschwanken lassen, was natürlich nur durch längere Zeit hin fortgesetzte Beobachtungen vom verankerten Schiff aus festgestellt werden kann. Auch hier sind als Ursachen wesentlich Windstöße erkannt und im Experiment nachgeahmt worden. Hierbei zeigte sich, daß auch interne stehende Wellen auftreten: nach Wedderburn erhält man ihre Periode, wenn die Länge des Beckens l, die Schichthöhen p und P, die zugehörigen Dichtigkeiten σ und σ_1 bekannt sind, aus der Formel

$$t = \frac{2\,l}{\sqrt{\dfrac{g\,(\sigma_1 - \sigma)}{\dfrac{\sigma}{p} + \dfrac{\sigma_1}{P}}}}$$

Werden die Schichtdicken p und P sehr klein gegen die Gefäßlänge l, wie meistens in der Natur, so kann man für eine n-knotige Schwingung nach Wilhelm Schmidt auch setzen

$$t = \sqrt{\frac{\sigma/p + \sigma_1/P}{ng\,(\sigma_1 - \sigma)}}.$$

Interne „Seiches“ sind wahrscheinlich die Ursache für die von O. Pettersson zuerst unter dem Eise des Gulmarfjords an der bohuslänschen Küste des Skagerrak beschriebenen starken periodischen Schwankungen in der Tiefenlage der schweren Unterschicht ($\sigma_1 = 1{,}024$), die im Februar und März 1909 sich zwischen 2 m und 27 m, also um 25 m, unter der Eisdecke verschob, mit einer Periode von 14 Tagen.

5e) Die Brandung. Wellen aller Art, die aus tiefem Wasser in flacheres übertreten, erleiden erhebliche Abänderungen in ihren Eigenschaften. Ihre Geschwindigkeit nimmt ab gemäß dem mehrfach erwähnten Gesetze $c = \sqrt{gp}$, so daß sich bei einem zum Ufer parallelen Wind die Wellenkämme nur in tiefem Wasser senkrecht gegen das Ufer einstellen, während sie je näher zum Strande immer weiter zurückbleiben und zuletzt in einem stumpfen Winkel auf den Strand auflaufen. Gleichzeitig wird die Wellenlänge kleiner, da diese ebenfalls der Quadratwurzel aus der Wassertiefe proportional ist. Dagegen bleibt die Wellenperiode unverändert, da durch die gegebenen Umstände jede Welle in gleicher Weise aufgehalten wird, sie also in unverändertem Zeitintervall am Strande eintreffen. Endlich aber wird die Wellenhöhe vergrößert und zwar nach Airys Untersuchungen im umgekehrten Verhältnis zur vierten Wurzel aus der Wassertiefe; noch rascher wächst sie beim Eindringen der Wellen in trichterförmig sich verengernde Buchten, nämlich umgekehrt proportional zur Quadratwurzel aus der horizontalen Breite. Während also durch Abnahme der Wassertiefe auf $^1/_{16}$ der ursprünglichen eine Verdoppelung der Wellenhöhe eintritt, bewirkt dasselbe schon eine Verengerung des Trichters auf $^1/_4$ der anfänglichen Breite. Umgekehrt wird bei einer Beckenerweiterung oder Zunahme der Tiefe dann notwendig wieder ein Abflachen der Wellenhöhen auftreten. Bei abnehmender Wassertiefe kann auch die Vorderseite der Welle nicht mehr vollständig ausgebildet werden, da sich das Durchflußprofil nach vorn hin stetig verengert; das Wellenprofil wird unsymmetrisch, die Vorderseite steiler, bis sich schließlich der Wellenkamm nach vorn überwölbt und niederbricht. Dieser Augenblick tritt immer ein, sobald die ganze Wellenhöhe gleich der Wassertiefe wird. Man spricht dann von Strandbrandung, da diese Vorgänge sich in dieser Form nur an sanft abfallendem Sand- oder Kiesstrande abspielen. Im Augenblick der Brandung erlangt die Orbitalbewegung der Wasserteilchen ihr Maximum (in der Formel $v = \frac{1}{2} cH/p$ wird $H/p = 1$). Nicht selten tritt ein Ueberbrechen der Wellenkämme auch schon in mäßigen Tiefen auf, die vielmal größer sind als die vorhandenen Wellenhöhen; es handelt sich dann meist um fern herkommende Dünungen mit ihren sehr beträchtlichen horizontalen Verschiebungen der Wasserteilchen in den Bodenschichten an stufenweise sich hebenden Bodenschwellen, wo die in der Tiefe eintretende Behinderung an die Oberfläche hinauf wirkt. Sand und Schlamm des Bodens wird durch diese „Grundseen“ aufgerührt, und auf das Schiffdeck schlagende Wellen lassen dort Sand zurück; Algenwuchs kann auf solchen Böden nicht gedeihen (wie in der Nordsee außerhalb Helgolands). Der Vorgang am Strande selbst ist mit einer Anhäufung von Wasser verbunden, wodurch dort ein Ueberdruck auftritt, der dann die unteren Wasserschichten seewärts hinausdrängt; an den Ostseeküsten ist dieser Unterstrom als Soog bekannt und bildet unter Umständen eine Gefahr für die Badenden, indem er deren Füße seewärts zieht. Dem Soog ist auch der Abtransport von allen losen Verwesungsresten seewärts zuzuschreiben, und wahrscheinlich ist dieser schwache Strom wesentlich an der Ausbildung der Wellenfurchen (Sandrippel) beteiligt, die sich nach auflandigem Winde im sandigen Strandgebiet einstellen. Unter wesentlicher Mitwirkung des Soogs bilden sich auch die merkwürdigen, dem Strande parallelen Sandrücken aus, die man an der Ost- und Nordsee als Riffe bezeichnet und die in zwei oder drei Reihen, von tieferem Wasser getrennt, dem Strande vorgelagert sind. Die brandenden Wellen-

massen stoßen den Strand schräg hinauf und strömen der ankommenden neuen Welle wieder entgegen. Die Stoßkraft der Brandung kann bei stürmisch bewegter See ein hohes Maß erreichen; nach Messungen von Stevenson sind Drucke von 30 bis 40 Tonnen auf 1 qm Fläche zu erwarten; doch rechnen für gewöhnliche Zwecke des Wasserbaues die Techniker für die Ostsee nur 10, für die Nordsee 15, für den Biskayagolf 18 t pro qm. Wie rasch gestrandete Schiffe in der Brandung zerschlagen werden können, ist bekannt.

Nicht mit der Strandbrandung zu verwechseln ist eine andere seltenere Art, die Klippenbrandung; sie entsteht an den steilen Felswänden, die sich aus tiefem Wasser jäh erheben, dadurch daß die von der Orbitalbewegung im Wellenkamm landwärts geschobenen Wasserteilchen an der Felswand nach oben hin ausweichen. Auch dieser senkrechte Stoß kann über 11 t pro qm betragen, und es sind Beispiele bekannt, wo an einsam aus tiefem Wasser sich erhebenden Felsen die darauf errichteten Leuchttürme durch die in die Höhe hinauf schlagenden Wassergarben beschädigt worden sind, noch in 30 bis 40 m über dem Wasserspiegel. Bei mäßigen Winden können Boote dicht an solche steile Felsen oder Bauten heranfahren.

Bedeutsam ist die mechanische Wirkung der Brandungswellen am Strande, wo die Angriffszone breit ist, durch starken Hub der Gezeiten und wo das den Strand bildende Material nach Lagerung und Festigkeit dem Wellenstoß nur wenig widerstehen kann. Sand-, Kreide- und Tonschichten werden dabei leicht zerstört, die feineren Teilchen gehen mit dem Soogstrom seewärts hinweg, die gröberen (wie Feuersteine, Diluvialgeschiebe) bleiben am Strande liegen und werden hier fortdauernd hin und her gewälzt, zerstoßen und zerrieben. Hierbei tritt dann auch ein seitlicher Transport ein, da die Wellen nur selten genau senkrecht gegen die Strandlinie auflaufen. Die brandenden Wasserteilchen werfen dann lose Körper schräg auf den Strand, wo sie eine parabolische Bahn (Wurfbahn auf schiefer Ebene) durchmessen und mit jeder neuen Welle ein mehr oder weniger großes Stück seitwärts verschoben werden. Die Techniker bezeichnen diesen ihnen sehr lästigen Transport der Geschiebe oder Wandersände als Küsten- oder Wellenstrom, die Geographen als Küstenversetzung oder Strandvertriftung. Dieser Transport bewirkt es z. B., daß die Feuersteine der französischen Kreidekliffe von Boulogne und Calais nicht nur ostwärts wandern, sondern auch dabei immer feiner zerrieben werden und zuletzt den trefflichen Badestrand von Blankenberghe bilden.

Auch an felsigen Küsten gräbt sich die Brandungswelle, mit ihren stetig wiederholten Stößen in alle Spalten und Fugen des Gesteins eindringend oder dieses auch chemisch auflösend (wie es bei Kalk geschieht), eine Hohlkehle aus, die rinnenartig die Strandlinie bezeichnet. In gezeitenlosen Meeren rückt diese Brandungskehle nur wenige Meter in das Gestein vor, und nur nach sehr starken Stürmen brechen neue Stücke der unterhöhlten Felswand oder Kliffs ab. Besteht ein hoher Hub der Gezeiten, so verlegt sich das Kliff ein Stück landeinwärts und die Wellen laufen nur noch bei Hochwasser in die Brandungskehle hinein, bei Niedrigwasser aber lassen sie eine mehr oder weniger breite Felsplatte frei. Man bezeichnet diesen Abtragungsvorgang als Abrasion, und nimmt an, daß bei einer Küstensenkung ganze Gebirge auf diese Weise von der Brandung abrasiert werden und Rumpfflächen entstehen können. Das von der Brandung losgebrochene Material wird sowohl seewärts durch den Soog weggeführt und bildet vor dem ehemaligen Felsabsturz eine Meerhalde, als auch durch die Strandvertriftung seitwärts verfrachtet, wo es in den Buchten angesammelt einen sanft abgeböschten Sandstrand bilden kann. Diese Abrasionsprozesse sind aber ausschließlich auf den Bereich des Strandes beschränkt; es ist unzulässig, den Wellen in Meerestiefen von 50 und mehr m irgendwelche zerstörenden und abrasierenden Funktionen zuzuschreiben. Es ist unmöglich, daß eine Felseninsel durch Abrasion allein ohne gleichzeitige Senkung etwa bis 50 oder mehr Meter abgetragen wird; das kann, wie die Beispiele der Hoofden erweisen, nur bis wenige (3 bis 6) Meter unter der Niedrigwasserfläche geschehen. Schon in Tiefen von mehr als 10 m unter Niedrigwasser überwiegt überall nur die Umlagerung und seitliche Verschiebung des in der eigentlichen Brandungszone aufbereiteten Materials, wobei jedoch neben dem schwachen Soog die Gezeiten- und Meeresströmungen ihrerseits auch ausräumend auftreten können.

6. Die Gezeitenströme. Die moderne Theorie faßt die Gezeiten als eine komplizierte Wellenbewegung auf, die durch Uebereinanderlagerung von Wellen verschiedener Periode ($12{,}42^h$ als Hauptmondtide, $12{,}00^h$ Hauptsonnentide, $23{,}92^h$ Mond-Sonnentide usw.) den Wasserstand periodisch auf- und abschwanken läßt. Indem die einzelnen Wellen sich durch die Meere bewegen, folgen sie den Gesetzen der Seichtwasserwellen, bei denen die Länge λ vielemal größer als die Wassertiefe ist und die Wasserteilchen sich in langgestreckten elliptischen Bahnen bewegen. Die Geschwindigkeit dieser Orbitalbewegung der Gezeitenwellen folgt dem früher gegebenen Gesetz $v = \frac{1}{2} Hc/p$, und da $c = \sqrt{gp}$, wird $v = {}^1/_2 H\sqrt{g/p}$; wir

empfinden sie als eine alle $6^1/_4$ Stunden alternierende Strömung, als Gezeitenstrom. Da die Wellenhöhe oder der Hub der Gezeiten in küstennahen Gewässern groß werden und in einzelnen Fällen über 10 m (in der Fundybai bei Springtide bis 16 m, im Bristolkanal und in der Bucht von St. Michel bis 12 m) betragen kann, kommt es zu sehr bedeutenden Stromstärken an Orten, wo die Flutwellen seitlich eingeengt werden. In der Pentlandföhrde wird die dort Roost genannte Strömung von 5 bis 6 m p. s. sehr gefürchtet, auch zwischen den Orkney-Inseln kommen 4 m p. s. vor, in der chinesischen Bucht von Hangtschou ($30^1/_2{}^0$ n. B.) sogar 6 m p. s. Wo Inseln und Klippen im Fahrwasser liegen und Wirbel bilden, ist zur Zeit des Ebbe- und Flutstroms die Schiffahrt fast oder ganz unterbrochen und nur in den kurzen Fristen des Stromwechsels möglich, wie in manchen Fjordengen Norwegens (Saltström bei Bodö). Entsprechend der langgestreckten Form der Orbitalellipse wird der Gezeitenstrom am Boden nur wenig schwächer, als an der Oberfläche, ist daher befähigt, im Bereiche der seichten Schelfflächen, namentlich in Küstennähe eine bedeutende Transportkraft zu entfalten. Er verhindert nicht nur die Ablagerung feinerer Sedimente, sondern wirkt ausräumend auf den Boden ein, indem an Stellen beschleunigten Stroms Rinnen von über 30 und 40 m an unseren Nordseeküsten, ja sogar von 100 bis 200 m Tiefe auch in Felsboden eingefurcht werden, wie das in den norwegischen und schottischen Gewässern vielfach aus den Seekarten zu entnehmen ist. Klippen und Inseln aus weichem Kreidegestein werden durch solche Gezeitenströme völlig weggeräumt, wie das für die Bodenkonfiguration der Hoofden und der Enge von Dover anzunehmen und in den Schicksalen Helgolands und seiner Düne in den letzten Jahrhunderten genauer zu verfolgen ist. An der Loslösung Englands vom europäischen Festland sind neben den Sturmfluten sicherlich die Gezeitenströme in hervorragendem Maße beteiligt. Als der Isthmus von Dover nach Calais noch bestand, mußten die beiden ihn im Westen und Nordosten begrenzenden Buchten besonders hohe Gezeiten entfalten, und in der Tat haben sich die damaligen Strandlinien mit ihren Feuersteinschottern in Höhen von 7 m über dem gegenwärtigen Hochwasserniveau nachweisen lassen, woraus sich ein Tidenhub von über 20 m ergibt. Auch im Bereiche des Ozeans selbst sind die Gezeitenströme an geeigneten Stellen nicht ganz ohne Wirkung, wo wie zwischen den Kanarischen Inseln beim Verlegen der Telegraphenkabel noch in 1800 und 2000 m der Boden ganz frei von Globigerinenschlamm geputzt gefunden oder im Indischen Ozean zwischen den Seychellen und Saya da Malhabänken bis 1700 m hin harter Grund gelotet wurde. In der freien Tiefsee selbst können die Gezeitenströme nur sehr schwach sein (nach genauerer Berechnung in 5000 m für einen Hub von 1,3 m nur 65 m in der Stunde), wohl aber müssen sie sich auf den Gipfeln der isoliert über den Tiefseeboden sich erhebenden unterseeischen Kuppen zu meßbaren Geschwindigkeiten steigern und erheblich dazu beitragen, daß die sich dort ansiedelnden benthonischen Organismen günstige Nahrungsbedingungen finden. — Wo mehrere Gezeitenwellen nach verschiedenen Richtungen hin einander durchkreuzen, folgt der resultierende Strom dem Parallelogramm der Kräfte und entwickeln sich sogenannte Drehströme, die während einer Tideperiode alle Richtungen rings um die Kompaßrose durchlaufen; sie werden auf den seichten Schelfflächen besonders zu einer gleichmäßigen Verteilung der Bodenablagerungen beitragen.

7. Die Meeresströmungen. 7a) Die Anordnung. Die in allen besseren Schul- und Handatlanten gegebenen Karten der Meeresströmungen stellen ein schematisches Bild dar, wie es aus vielen tausenden von Schiffsbeobachtungen abgeleitet worden ist. Im Atlantischen und Pazifischen Ozean ordnen sich symmetrisch in den beiden Passatgebieten je ein nach Westen gerichteter Nördlicher- und ein Südäquatorialstrom an, beide etwas nördlich vom Aequator getrennt durch eine im östlichen Teil besonders regelmäßige, äquatoriale Gegenströmung (im Atlantischen Ozean als Guineastrom bezeichnet). Die Passatströme schwenken auf die Kontinente treffend polwärts ab, wo sie unter dem Namen des Florida- oder Golfstroms und des Brasilienstroms im Atlantischen Ozean, des Kuroschio und des Ostaustralstroms im Pazifischen bekannt sind, und gehen dann im Bereiche der Westwinde höherer Breiten nach Osten, wobei sie mit einem Teil ihrer Gewässer als Kanarien- und Benguelastrom in dem einen, als Kalifornischer und Peruanischer Strom im anderen Ozean in den Rücken der Aequatorialströme zurückbiegen. Es entsteht so in der Nordhemisphäre ein uhrzeigergemäß, in der Südhemisphäre ein entgegengesetzt bewegter Stromkreis. Im Indischen Ozean ist der letztere südlich vom Aequator in allen Jahreszeiten zu finden, nur in eine etwas südlichere Lage verschoben, während in nördlichen Breiten die Strömungen des Meeres denen der Luft folgen, indem mit dem sommerlichen Südwestmonsun die Gewässer nach Osten, mit dem winterlichen Nordostmonsun umgekehrt nach Westen strömen und in dieser Zeit dann ein Aequatorialgegenstrom südlich vom

Aequator nach Osten hin auftritt. In den höheren Breiten der Südhalbkugel ist eine in sich ringförmig geschlossene Ostströmung zwischen 35° und 55° s. B. vorherrschend, der am Rande des antarktischen Festlandes eine westwärts gerichtete Gegenströmung zur Seite steht. In den höheren Nordbreiten des Atlantischen Ozeans geht ein großer Teil der Westwindtrift an der West- und Nordwestküste Europas unter dem Namen der Golfstromtrift nördlich von Schottland ins europäische Nordmeer hinein, um einen neuen, dem Uhrzeiger entgegengesetzten Stromring an Spitzbergen und Ostgrönland zurückbiegend zu bilden. Ein anderer Teil der Golfstromtrift geht südlich von Island vorüber als Irmingerstrom nach der Südspitze Grönlands und bildet mit dem Labradorstrom einen zweiten Wirbel gleicher zyklonaler Drehrichtung. Auch in den Nebenmeeren der Nordhalbkugel herrscht dieser selbe Typus der dem Uhrzeiger entgegengerichteten zyklonalen Strömungen im allgemeinen vor, doch mangelt ihnen noch mehr die Regelmäßigkeit, als den ozeanischen. — Die Stärke der Meeresströmungen der äquatorialen Regionen übersteigt selten 0,6 m p. s., in den höheren Breiten kaum die Hälfte; doch können sie, gegen das Land gedrängt, wie der Floridastrom, der Agulhasstrom, der Monsunstrom an der Somaliküste im Winter und der Kuroschio im Sommer zeitweise das Maß von 2 m p. s. überschreiten und dadurch für die Schiffahrt von großer Bedeutung werden.

7b) Die Theorie der Meeresströmungen ist erst in den letzten Jahrzehnten auf eine festere Grundlage gestellt worden. Es hat sich ergeben, daß stets ein ganzer Komplex von ineinander greifenden und teilweise einander entgegengesetzten Ursachen zugleich wirksam ist. Diese Stromkonstituenten zerfallen in solche, die als Energieträger die Bewegungen schaffen, und in andere, die die vorhandenen Bewegungen mehr oder weniger stark beeinflussen. Zu diesen akzessorischen Konstituenten gehören:

α) Die Erdrotation, die ebenso wie in der Atmosphäre so auch im Meere auf der nördlichen Hemisphäre alle Strömungen nach rechts, auf der südlichen nach links aus ihrer Bahn drängt, so daß die von regelmäßigen Winden, wie den Passaten und Monsunen, unmittelbar an der Meeresoberfläche erregten Triftströme um 45° von der Windrichtung abweichen (der Nordostpassat liefert einen Strom nach Westen, der Südwestmonsun einen solchen nach Osten). Dieses früher bezweifelte Eingreifen der Erdrotation ist aus einer zweckgemäßen Vergleichung von gleichzeitigen Strom- und Windbeobachtungen in der Ostsee, im Mittelmeer und im Indischen Ozean nunmehr sicher erwiesen, auch nach der mathematischen Analyse (gemäß Walfrid Ekman) so zu erwarten.

β) Die Kontinuitätsbedingung, die es unmöglich macht, daß im strömenden Wasser leere Räume entstehen, und die erfordert, daß irgendwohin weggeführtes Wasser sofort von einer Seite oder aus der Tiefe ersetzt werde. Daher die schon von Varenius 1650 richtig aufgestellte Regel: si pars oceani movetur, totus oceanus movetur. Auf diese Weise entsteht, wie passend angeordnete, einfache Experimente sofort erweisen, in dem windfreien Raum zwischen zwei gleich gerichteten Triftstromgebieten ein Gegenstrom, wie zwischen den atlantischen Passaten der Guineastrom; ein auf die Küste in schrägem Winkel auftreffender Strom wird nicht etwa als Ganzes (wie ein Lichtstrahl) reflektiert, sondern teilt sich, wobei ein Teil in den Rücken des Stroms zurückbiegt; in einer Bucht, vor deren Oeffnung ein Strom vorüberfließt, entsteht ein Gegenstrom (eine Neer, oder Neerstrom genannt); also kurz neben den unmittelbar erregten gezwungenen Strömen entsteht ein oft kompliziertes System von freien Strömen. Wird der Oberflächenstrom örtlich irgendwie beschleunigt, so tritt durch Druckentlastung Wasser aus der Tiefe hinauf und mischt sich dem Oberflächenwasser bei, wodurch es abgekühlt wird. Dasselbe geschieht, wenn divergierend gerichtete Stromimpulse auf dieselbe beschränktere Oertlichkeit einwirken, namentlich aber, wenn ablandige Winde das Wasser von einer langen Küste abdrängen. Auf diese Weise entsteht das kalte Auftriebwasser im Rücken der Passate des Atlantischen und Pazifischen Ozeans, während der Indische Ozean nur zur Zeit des Südwestmonsuns an der Küste des Somalilandes und Südarabiens diese Erscheinung aufweist; der Westküste Australiens fehlt sie, da das vom Südostpassat weggeführte Wasser von Nordosten her an der Oberfläche ersetzt werden kann.

γ) Die Reibung, die in einer noch nicht genau angebbaren Form, vermutlich durch Wirbelbildung, erhebliche Energiemengen aufzehrt, während sie ungleich weniger als innere Reibung der Flüssigkeitsteilchen gegeneinander oder als äußere Reibung des Wassers gegen die Küsten und den Boden in Betracht kommt.

Energieliefernde Stromkonstituenten sind folgende.

δ) Die Dichteunterschiede. Wegen der Verschiedenheiten der Temperaturen und des Salzgehalts nebeneinander liegender Wassersäulen sind die Drucke in gleichen Niveauflächen verschieden und entstehen zum Ausgleich Wasserbewegungen

als Konvektionsströme, und zwar bewegt sich dabei ein Strom an der Oberfläche von der Gegend des leichteren Wassers in der Richtung auf das schwerere hin, während in der Tiefe die Bewegung entgegengesetzt ist, und im Bereiche der leichteren Säule eine aufsteigende, in der schwereren eine absteigende Bewegung den Abschluß einer vollständigen vertikalen Zirkulation liefert. In der Mitte der Wassermasse liegen entlang einer Niveaufläche die beiden entgegengesetzten Ströme dicht übereinander, und die sie trennende stromlose Schicht bezeichnet man als Grenzfläche. Die an der Oberfläche vorhandenen Dichteunterschiede ergeben Abweichungen nach oben oder nach unten hin, die man durch Isohypsen graphisch darstellen kann; man erhält so ein Bild der sogenannten Dichtigkeitsfläche. Einfacher als dieses von H. Mohn entwickelte Verfahren ist es, eine willkürliche Tiefe zu wählen und den in dieser herrschenden Druck aus Temperatur und Salzgehalt der Wassersäule zu berechnen, sodann hiernach die Länge einer Wassersäule von der Dichte = 1 (von salzfreiem Wasser) zu bestimmen, die den gleichen Druck hat; hieraus erhält man dann ebenfalls ein Maß für die Druckgefälle. Ein drittes, von V. Bjerknes angegebenes, von J. W. Sandström, Helland-Hansen und Nansen angewandtes Verfahren untersucht die Druckvertreilung entlang vollständiger oder partieller Profilschnitte; es werden die Flächen gleichen Drucks oder Isobaren berechnet und graphisch konstruiert, und zur Darstellung der Dichteunterschiede die Isosteren oder Linien gleichen spezifischen Volums (des Volums der Gewichtseinheit oder der Reziproke der $S_{4^0}^{t^0}$) in denselben Profilschnitt eingetragen. Aus der größeren oder geringeren Zahl der dann auftretenden Maschen (oder Solenoide) läßt sich ein Urteil über die Druckrichtung und das Druckgefälle entlang der Schnittebene ableiten. Die aus diesen Dichtedifferenzen entstehende Strombewegung wird durch die Erdrotation seitlich abgelenkt, so daß sie fast parallel den Isohypsen erfolgt, und ihre Geschwindigkeit ist durch die Reibung (Wirbelbildung) nur klein. Es entwickeln sich auf diese Weise namentlich in den landumschlossenen Nebenmeeren höherer Breiten, in denen das Landwasser eine Verdünnung an den Küsten gegenüber der Mitte hervorruft, zyklonale Stromtendenzen, wie in der Nordsee, der Ostsee, dem Schwarzen Meer, der Adria, dem Japanischen und Ochotskischen Meer, wo überall der Strom sich rechts ans Land anlehnt. Der entgegengesetzte antizyklonale Typus ist meist nur partiell erkennbar, wie um Grönland und Island. Als Ganzes werden sich aber in den Bodenschichten der großen Ozeane die schweren Gewässer der Polarregionen auf den Aequator hin, in den Oberflächenschichten auf die Polarräume hin bewegen; doch verbergen sich die letztgenannten Stromtendenzen hinter den ungleich kräftigeren, von der Atmosphäre ausgehenden Oberflächentriften, während jene kalten Bodenströme aus der Verteilung der Bodentemperaturen (oben S. 801) und ihr vertikal aufsteigender Ast durch die (S. 801) erwähnte Temperaturerniedrigung am Aequator von 200 bis 1000 m Tiefe deutlich erkennbar sind. Zu meßbaren Geschwindigkeiten werden sie sich allerdings nur da erheben, wo sie eine Verengung des Stromweges erleiden, wie z. B. über dem Wyville-Thomson-Rücken, der die Färöer mit den Shetlandinseln und dem Nordseeschelf verbindet, wo der Bodenstrom ausreicht, eine Ablagerung des Globigerinenschlammes zu verhindern. Besonders deutlich pflegen die Dichteströme in den Meeresstraßen zwischen Ozeanen und ihren Nebenmeeren aufzutreten, wobei zwei Typen zu unterscheiden sind: die Straßen der höheren Breiten, wo das Nebenmeer durch Zufuhr von Landwasser ein höheres Niveau erhält, und die Straßen der niederen Breiten, wo im Nebenmeer die Verdunstung stärker ist als die Zufuhr von Land- und Regenwasser, also das Niveau tiefer als im Ozean. Zur ersten Art gehören die Belte und das Kattegat, der Bosporus und die Dardanellen, die Cabotstraße und vor allem das Nördliche Eismeer in der Dänemarkstraße und Baffinbai. Zur zweiten Kategorie zählt die Straße von Gibraltar, das Bab el Mandeb und die Straße von Ormuz. Immer bewegt sich das leichtere Wasser beim ersten Typus an der Oberfläche in den Ozean hinaus, so in den Belten nach N, aber in der Gibraltarstraße ins Mittelmeer hinein; das schwere Wasser als Tiefenstrom aber dem entgegen, also in den Belten in die Ostsee hinein, bei Gibraltar in den Ozean hinaus; hier macht es sich in intermediären Schichten durch eine Erhöhung der Temperatur und des Salzgehalts bis nach Irland hin noch bemerkbar. — In den meisten Fällen wird aber in den Meeresstraßen die regelmäßige Entfaltung dieser Vertikalzirkulation durch das Eingreifen anderer Stromkonstituenten und namentlich auch der Gezeitenströme gestört, die ja die ganze Wassermasse einheitlich mit großer Kraft bald in der einen, bald in der anderen Richtung verschieben. Dadurch wird die Grenzfläche zwischen dem Ober- und Unterstrom je nach der Tidenphase sehr veränderlich in ihrer Lage; und deshalb hat man früher durch vereinzelte Beobachtungen sehr stark widersprechende Angaben für die Stromverteilung entlang der Vertikalen erhalten. Dazu treten dann noch interne Wellen an der Grenzfläche, so daß sich die Stromvor-

gänge in gezeitenbewegten Meeresstraßen nach einer sehr komplizierten Periode abspielen und genauer nur durch in kurzen zeitlichen Zwischenräumen an derselben Station wiederholte Messungen der Temperatur-, Salzgehalt- und Stromschichtung erkannt werden können. Die modernen Erfahrungen haben dies besonders für die Belte und die Gibraltarstraße bestätigt.

Eine besondere Art von Konvektionsströmen bilden die von O. Pettersson und Sandström zuerst experimentell untersuchten Eisschmelzströme. Wo größere Eismassen, wie das antarktische Inlandeis, tief in das Meer eintauchen, steigt nicht nur Schmelzwasser an der Eiswand entlang in die Höhe und fließt seewärts ab, sondern strömt im Niveau der Unterkante des Eises von der offenen See her, zum Ersatz für das mit dem Schmelzwasser davon geführte, salzigeres Seewasser auf das Eis zu; es wird dann ein Teil desselben abgekühlt und sinkt, ohne seinen Salzgehalt zu verändern, in die Tiefen ab, um als kalter Bodenstrom wieder seewärts davon zu gehen. Es entsteht auf diese Weise also eine doppelte Vertikalzirkulation, die sich im Experiment sehr lebhaft entfaltet, in der Natur aber kaum außerhalb der hohen Südbreiten eine Bedeutung gewinnt; wie dadurch die Ablagerung der Kieselgehäuse der so zahlreich am Eisrande wuchernden Diatomeen in ihrem antarktischen Wohngebiete selbst verhindert wird, ist schon früher erwähnt (S. 795). Den Meeren der Nordhemisphäre mangeln solche geschlossenen in mehrere 100 m Tiefe hinabreichende Eismassen.

ε) Luftdruck- und Windwirkung. Wichtige Energiequellen für Wasserbewegungen liefert vor allem die Atmosphäre. Schon der Luftdruck allein wird mit seinem örtlich sich ändernden Gewicht auf die Meeresoberfläche einwirken, indem ein zunehmender Druck das Niveau senkt, ein abnehmender es hebt. Druckgradienten entstehen im Wasser also dann, wenn der Luftdruck sich ändert, und zwar folgt die Oberfläche den Barometerschwankungen mit dem 13fachen Betrage. Da der Luftdruck die ganze Wassermasse bis zum Boden hin gleichmäßig erfaßt, werden solche barometrischen Differenzen verschieden auf Ober- und Unterströme wirken. In den offenen Ozeanen sind auch sie von geringem Effekt; um so wichtiger sind sie für die Nebenmeere, namentlich für die Strömungen in deren Zugangstoren. Für die Belte und die Ostsee hat M. Knudsen sie näher untersucht und bewiesen, daß das Erscheinen von Barometerdepressionen in den heimischen Meeren geradezu für die Stromrichtung und -stärke in den Belten maßgebend wird. Er vermochte dafür die Formel für die Stromgeschwindigkeit aufzustellen

$$v = \frac{\varrho - \varepsilon}{a} + c(B - B_0)$$

worin ϱ die Niederschlagsmenge, ε die Verdunstung, a den Querschnitt der Ausgangstore (in der Beltsee = 0,8 qkm), c eine Konstante (für die Ostsee = 22,1), B_0 den ursprünglich gleichen Barometerstand über Ost- und Nordsee, B den neuen Stand über der Nordsee vorstellt; das positive Vorzeichen ergibt den ausgehenden Strom durch die Belte nach N, wobei die Geschwindigkeit v in cm p. s. erhalten wird. Auch in der engen Floridastraße machen sich die Luftdruckschwankungen in der Weise auf die Geschwindigkeit des Florida- oder Golfstroms geltend, daß, wenn sich ein Luftdruckmaximum im unteren Mississippigebiet entwickelt, der Strom stärker wird, obwohl in der Straße ein Nordwind ihm entgegen weht, während beim Auftreten einer Luftdruckdepression im Golf von Mexiko der Strom abflaut trotz des dann in der Straße herrschenden Südwinds.

Ungleich wichtiger und entscheidend für die Wasserbewegungen an der Oberfläche der offenen Ozeane sind aber die Winde als Erreger von Triftströmen, wie das die praktischen Seeleute seit alters behauptet haben. Die Entstehung der Triftströme selbst hat schon A. v. Humboldt richtig dargestellt; die eingehende mathematische Analyse verdanken wir K. Zöppritz und W. Ekman. Ist die mit der Wasseroberfläche in inniger Berührung stehende Luft nach einer bestimmten Richtung hin in stetiger Bewegung, so werden die die oberste Wasserschicht bildenden Wasserteilchen mitgenommen, aber nur mit einem Bruchteil der Windgeschwindigkeit, da die nächste darunter liegende Wasserschicht sie festhält. Doch wird auch diese zweite Schicht nicht in Ruhe bleiben können, sondern der oberen, wenn auch abgeschwächt folgen, und wie diese wird sich die darunter liegende dritte, vierte und die folgenden Schichten verhalten, nur daß die Geschwindigkeit sich nach unten hin immer gegen die der darüber liegenden Schicht etwas vermindert. Bei einer unendliche Zeit hindurch fortgesetzten Wirkung dieser Art kann die Uebertragung der Impulse schließlich nur ihre Grenze am Meeresboden selbst finden; an diesem bleiben die Wasserteilchen haften. Da nach der Theorie die Uebertragung dieser Triftimpulse von der inneren Reibung bestimmt ist, könnten Aenderungen in der Windstärke und Windrichtung nur äußerst langsam in die Tiefe vordringen. Man erkannte aber sehr bald, daß durch die vom Winde gleichzeitig erregte Wellenbewegung, nament-

lich wenn bei lebhaftem Luftstrom die Wellenkämme überbrechen, die Triftimpulse erheblich rascher nach der Tiefe hin fortschreiten müssen, und daß bei den im Ozean gewöhnlich auf großen Flächen gleichzeitig verschieden starken und verschieden gerichteten Winden notwendig Wirbelbewegungen auftreten müssen, wodurch die Ausbildung von Triftströmen in der einfachen Form der Zöppritzschen Theorie verhindert wird. Walfrid Ekman bewies dann weiter, daß ein von F. Nansen zuerst erhobener Einwand zu Recht bestehe, wonach Zöppritz das Eingreifen der Erdrotation nicht beachtet habe; durch diese wird zunächst die Oberflächentrift um 45° nach rechts (in Nordbreiten) vom Winde abgelenkt und wird beim Weitergeben der Triftimpulse in die nächst tieferen Schichten hin dieser Ablenkungswinkel stetig wachsen, so daß es eine nicht sehr tief gelegene Schicht geben müsse, deren Bewegung bis 180° abgelenkt, also der Oberflächentrift gerade entgegen gerichtet sei. Der Abstand D dieser Schicht von der Oberfläche richtet sich nach den angetroffenen Reibungswiderständen und Ekman bezeichnet sie als Reibungstiefe oder als Triftstromtiefe; die mittlere Stromrichtung der so vom reinen Triftstrom beherrschten Schicht bis zur Tiefe D liegt im Winkel von 90° zum Winde, sobald es sich um homogenes Wasser und eine offene See von unendlicher horizontaler Erstreckung handelt. In Küstennähe und in abgeschlossenen Wasserbecken überhaupt werden die Verhältnisse erheblich geändert. Dann sind nach Ekman drei strömende Schichten zu unterscheiden: in der Oberschicht bis zur Tiefe D der reine Triftstrom, in der Bodenschicht von gleicher Mächtigkeit = D ein Bodenstrom, zwischen beiden ein sogenannter Tiefenstrom, der sich in einem mittleren Stockwerk mit einer Geschwindigkeit von 0,4 bis 0,7 der Oberflächentrift zur Küste parallel bewegt. Ist im Triftstrom eine auflandige Komponente vorhanden, so drängt das an der Küste aufgestaute Wasser den Bodenstrom seewärts hinweg, wobei eine absteigende Bewegung in Landnähe auftritt. Liegt die Küste so, daß der Triftstrom das Wasser seewärts wegdrängt, so hat der Bodenstrom eine auflandige Komponente und steigt Tiefenwasser in Landnähe auf. Diese Vorgänge entfalten sich in tiefem ozeanischem Wasser mit Wassertiefen von über 2 D; in seichterem Wasser ($p < 2D$) wird der Tiefenstrom sich nicht ausbilden und drückt der vermehrte Reibungswiderstand die Trift der ganzen Wassermasse mehr in die der Windrichtung hinein. Nach dieser von W. Ekman modifizierten Trifttheorie wären auch in den tieferen Schichten der Ozeane nicht unbedeutende Stromgeschwindigkeiten zu erwarten; doch mangelt es bisher an einer ausreichenden Nachprüfung durch Strommessung, und die technischen Schwierigkeiten, die dabei zu überwinden sind, müssen als sehr erheblich anerkannt werden. Die Bestimmung der für die ganze Theorie so wichtigen Reibungstiefe ist ebenfalls noch ganz unsicher. Nach Ekmans Formeln ist D proportional der Windstärke und nimmt vom Aequator, wo sie unendlich tief liegt, zuerst sehr rasch, dann langsamer mit der Breite ab; wird ihr Wert am Pol = 100 gesetzt, so ist sie in 60° Br. = 107, in 40° = 125, in 20° = 171, in 10° = 240. Für die Berechnung ist absolut erforderlich Kenntnis der Triftkonstante, d. h. der Stromstärke, wie sie 1 m p. s. Windgeschwindigkeit entspricht. Nach Nansens Beobachtungen auf der Framtrift sollte sie nur 1,9 cm p. s. sein; nach älteren Bestimmungen von H. Mohn für das nordatlantische Passatgebiet aber 4,92 und neueren von Gallé für den offenen Indischen Ozean 4,4 cm p. s., also mehr als doppelt so groß. Ferner müßte man auch das Maß der wirklichen Reibungswiderstände (der virtuellen Reibung) für ozeanische Strömungen kennen, was aber der Messung unzugänglich ist. Dennoch scheint dem Begriff der Reibungstiefe eine reale Bedeutung zuzukommen. Bei den neueren Tiefseeexpeditionen fiel es übereinstimmend namentlich in den Passatgebieten auf, daß die in die Tiefe versenkten Netze von 120 bis 150 m abwärts stark abtrieben, was auf eine in diesem Niveau liegende Grenzfläche für den Oberflächenstrom hinweist. Nach der (in rohester Annäherung gestatteten) Annahme, daß diese Reibungstiefe gemäß einer Beobachtung der Planktonexpedition in 8° n. B. bei 150 m lag, würde sie nach Ekmans Formeln in 20° B. bei 95, in 40° B. bei 69, in 60° B, bei 60 m erwartet werden. Ebenso erhielte man, diese Werte in Ekmans Formeln einsetzend, als Maß der virtuellen Reibung nicht weniger als 24 bis 30 cgs, also rund 3000 mal mehr als die sogenannte innere Reibung des Seewassers erwarten ließe. Jedenfalls weist dieser große Unterschied auf das Eingreifen von Wirbelbewegungen hin, die bei allen bewegten Flüssigkeiten eine ungeheure Energie verbrauchen. — An der überragenden Bedeutung der Triften unter allen Stromkonstituenten der offenen Meere kann heute ein Zweifel nicht mehr bestehen. Die anfangs (S. 810) beschriebenen symmetrisch zwischen dem Aequator und 50° n. u. s. B. angeordneten Stromkreise entsprechen genau den antizyklonalen Windsystemen um das Luftdruckmaximum der sogenannten Roßbreiten, und wenn der Nordostpassat seine Trift nicht nach Südwesten, sondern nach Westen entsendet,

so entspricht dies der theoretisch geforderten Ablenkung der Oberflächentrift um 45° nach rechts auf der Nordhemisphäre. Ebenso entspricht den vorherrschenden zyklonalen Luftströmungen im Gebiete zwischen Grönland und Spitzbergen eine ebenfalls zyklonale Anordnung der Meeresströme im europäischen Nordmeer und dem nördlichsten Teil des Nordatlantischen Ozeans, und nicht minder der großen antarktischen Antizyklone mit ihren östlichen Winden jenseits des Südpolarkreises der dort vorherrschende Weststrom südlich von 55° und 60° s. B.

Der Theorie ganz gemäß treten auch in Küstennähe die Wirkungen des Windstaus auf; man kannte sie schon lange bevor Ekmans Theorie erschien und gut aus den bei Sturmfluten in den heimischen Gewässern gewonnenen Erfahrungen. Aus diesen stellte Colding für abgeschlossene Gewässer folgende Beziehung auf: $h = 0{,}000000763 \frac{L}{p} . w^2 . \cos^2 \alpha$, wo h den Niveauunterschied zwischen der Luv- und der Leeküste, L die Länge der vom Wind bestrichenen Wasserfläche (in m), p die Wassertiefe, w die Windgeschwindigkeit und α den Winkel zwischen der Windrichtung und der Ebene des untersuchten Wasserprofils bedeutet. Diese Wirkung wird demnach in den seichteren Meeren bei großer Windstärke erheblich werden; außer für die Ostsee und deren Haffe sind namentlich im Asowschen Meere Staubeträge bis zu 4 und 5 m über Mittelstand bekannt geworden. Der diesen Windstau begleitenden Oberflächentrift aufs Land zu entspricht ein Unterstrom seewärts (der Soog) und gerade dieser hat bei Sturmfluten an den Nordseeküsten, wo unter den Watten und Marschen häufig Moorböden liegen, durch Auskolken des nachgiebigen Bodens dauernde Landverluste zur Folge gehabt, wie u. a. die Ausbildung des Dollarts (1277 und 1287). — Auch wo der Windstau keine solchen gesteigerten Niveauerhebungen an der Luvseite mit entsprechenden Senkungen an der Leeseite erzielen kann, macht sich in nächster Nähe der Küste die vertikale Bewegung der Wasserteilchen noch fühlbar durch auffallende Temperaturerscheinungen. An den Leeküsten, die im Rücken der Passate liegen, ist allgemein, wie bereits bemerkt (S. 811 unter β), kaltes Wasser zu finden, und zwar um so kälteres, je tiefer in die Küstenbuchten hinein man kommt. Umgekehrt sind die Luvküsten durch Anhäufung von tropisch stark erwärmtem Wasser ausgezeichnet. Wenn Tiere, wie die riffbauenden Korallen, ein hoch liegendes Temperaturminimum beanspruchen, so gedeihen sie vortrefflich an solchen Luvküsten, meiden aber die auch in den äquatornahen Buchten bis 15°, ja 14° durch Auftrieb von unten ausgekühlten Leeküsten.

7c) Erosionswirkung. Vermöge ihrer geringen Geschwindigkeit (s. S. 811 unter 7a) sind die Meeresströmungen im allgemeinen nur befähigt, die allerfeinsten Sedimente zu bewegen; es müssen besondere Umstände örtlich gegeben sein, wenn sie den Globigerinenschlamm an der Ablagerung verhindern (oben S. 812). Eine unmittelbare Erosionsleistung wird kaum anders als in den Meeresstraßen deutlich; so hat man seit dem Altertum im Bosporus eine ganze Reihe von Riffen verschwinden und zu Bänken abtragen gesehen, ja eine Zunahme der Breite (von 740 m oder 4 Stadien an der Brücke des Darius auf 1000 m) behauptet; hier handelt es sich aber auch um die ungewöhnlichen Geschwindigkeiten von 1½ bis 2 m p. s. an der Oberfläche und noch 0,5 m p. s. am Boden in 40 m Tiefe. An den ozeanischen Küsten hat die Strandvertriftung (S. 809) mit den Gezeitenströmen (S. 810) jedenfalls eine ungleich deutlichere Wirkung.

Literatur, *Zu 1:* **O. Krümmel**, *Handbuch der Ozeanographie, Bd. I, 2. Aufl., Stuttgart 1906. Auch für das Folgende. — Zu 2:* **A. Supan**, *Die Bodenformen des Weltmeers in Petermanns Mitt. 1899, S. 177. — Zu 3:* **J. Murray** *und* **A. Renard**, *Deep-Sea Deposits (The voyage of the Challenger), London 1891. —* **E. Philippi**, *Die Grundproben der deutschen Südpolar-Expedition 1901 bis 1903, Berlin 1909. — Zu 4:* **W. Brennecke**, *Die Forschungsreise SMS. „Planet“ 1906/07, Berlin 1909, Bd. 2 und 3. —* **E. Ruppin**, *Alkalinität des Meerwassers, Meerwasser, Kohlensäure, kohlensaurer Kalk — ein System aus 3 Bestandteilen nach der Phasenregel, in Wissenschaftl. Meeresuntersuchungen, Kiel und Leipzig 1909, N. F. Bd. 11, S. 277. —* **G. Schott**, *Wissensch. Ergebnisse der deutschen Tiefsee-Expedition, 1. Bd., Ozeanographie und Meteorologie, Jena 1902 (mit Atlas). —* **G. Schott** *und* **F. Schu**, *Die Wärmeverteilung in den Tiefen des Stillen Ozeans in Annalen der Hydrographie, Berlin 1910, S. 2. — Zu 5:* **O. Krümmel**, *Handbuch der Ozeanographie, Bd. II, 2. Aufl., Stuttgart 1911. Auch für die folgenden Abschnitte. — Zu 6:* **Derselbe**, *Ueber Erosion durch Gezeitenströme. In Petermanns Mitteilungen 1889, S. 134. — Zu 7:* **G. Wegemann**, *Die Oberflächenströmungen des Nordatlantischen Ozeans nördlich von 50° n. B. in Aus dem Archiv der Seewarte 1900, S. 14. —* **V. Bjerknes**, *Kongl. Svenska Vetensk. Akad. Handl. 1898, Bd. 31. —* **M. Knudsen** *in Beretning fra Kommissionen for videnskab. Undersögelse af de Danske Farvande, Bd. 2, Kopenhagen 1899 S. 65 Wirkung des Luftdrucks). —* **K. Zöppritz**, *Ueber Triftströme, Annal. d. Phys. 1878, Bd. 3, S. 582. —* **Walfrid Ekman**, *Beiträge zur Theorie der Meeresströmungen, Ann. der Hydrographie 1906, S. 423. —* **O. Pettersson** *in Geographical Journal, London 1906, Bd. 24, S. 285 und 1907. Bd. 15, S. 279 (Eisschmelzströme).*

O. Krümmel.

Melde
Franz Emil.

Geboren am 11. März 1832 in Großenlüder bei Fulda, gestorben am 17. März 1901. Er war der Sohn eines Apothekers, besuchte das Gymnasium zu Fulda, dann die Universität Marburg. Nach kurzem Aufenthalt in Hanau wurde Melde 1860 Assistent am physikalischen Institut in Marburg, 1864 außerordentlicher, 1866 ordentlicher Professor für Physik in Marburg. Melde hat sich besonders um die Erforschung der Akustik verdient gemacht und eine Reihe von Apparaten und Demonstrationsmethoden dafür angegeben; er arbeitete auch auf dem Gebiet der Zeitmessung. Eine Schilderung von Chladnis Leben und Wirken stammt aus seiner Feder.

Literatur. *Nekrolog von* ***K. Schaum,*** *Phys. Rev. 13, S. 125 bis 127, 1901.*

E. Drude.

Melloni
Macedonio.

Geboren am 11. April 1798 in Parma; gestorben am 11. August 1854 in Portici. Er war seit 1824 Professor der Physik in Parma, floh 1831 wegen politischer Umtriebe nach Paris, wurde 1839 Direktor des Konservatoriums der Künste und Gewerbe in Neapel, leitete bis 1848 das meteorologische Observatorium auf dem Vesuv. Melloni stellte grundlegende Untersuchungen über strahlende Wärme an; er wies als Erster die Wärme des Mondlichts nach.

E. Drude.

Mendelejeff
Dimitry.

Geboren am 8. Februar 1834, gestorben am 1. Februar 1907, hat sich auf dem Gebiete der physikalischen Chemie durch Experimentaluntersuchungen über Gase, Flüssigkeiten, wässerige Lösungen, bekannt gemacht. Berühmt wurde er durch die Veröffentlichungen, die das periodische System der Elemente, dieses „erfolgreiche Mittel, ein übersichtliches System von Tatsachen festzustellen“, zum Gegenstand haben. Den Ruhm dieser Tat teilt er mit Lothar Meyer. Die wichtigen Folgerungen, die sich aus den periodischen Beziehungen zwischen Atomgewichten der Elemente und ihren Eigenschaften ziehen lassen, zeigten sich bald, besonders in der großen Abhandlung Mendelejeffs in den Annalen der Chemie Suppl. Band 8 S. 133 (1871): Die periodische Gesetzmäßigkeit der chemischen Elemente. Es konnten mit Erfolg wesentliche Aenderungen der Atomgewichte vorgeschlagen werden, wenn die Stellung der betreffenden Elemente im System nicht mit der Größe der bisherigen Werte im Einklang war. Mit prophetischem Blick vermochte Mendelejeff die Existenz noch unbekannter Elemente aus Lücken des periodischen Systems vorauszusehen. Seine Prognosen fanden glänzende Bestätigung durch die spätere Entdeckung des Galliums, Scandiums, Germaniums.

Mendelejeff schrieb zuerst in russischer Sprache ein großes Lehrbuch Grundlagen der Chemie (1. Auflage 1868 bis 1871), das in vielen Auflagen, auch deutsch, erschien und durch seine großzügige Anlage sowie durch den Reichtum an eigenartigen Gedanken höchst anregend gewirkt hat und noch wirkt.

Literatur. *Nekrolog von* ***P. Walden,*** *Ber.* ***41,*** *4719.*

E. von Meyer.

Meneghini
Giuseppe.

Geboren am 30. Juli 1811 in Padua, erhielt 1834 die medizinische Doktorwürde an der dortigen Universität, an der er im selben Jahre botanischer Assistent und 1838 ordentlicher Professor der Physik, Chemie und Botanik wurde. Für seine Arbeitsrichtung war seine Bekanntschaft mit Zanardini von besonderem Einfluß. 1848 nahm er an den italienischen Freiheitskämpfen teil gegen Oesterreich und verlor dadurch sein Amt, wurde aber 1849 zum Professor der Mineralogie und Geologie in Pisa ernannt. Hier erwarb er sich als Lehrer große Verdienste und starb daselbst am 28. Januar 1889. Am erfolgreichsten ist er als Algenforscher gewesen. Zu erwähnen sind sein Conspectus Algologiae Euganeae und De Bryopsidum fructificatione (beide 1836), die Monografia delle Anabaine (Padua 1839), die Arbeiten über italienische, dalmatinische und andere Mittelmeeralgen (1840 bis 1846), Delle Alghe viventi nelle Terme Euganee (1844), Monographia Nostochinearum Italicarum (Turin 1846), Sulla animaltà delle Diatomee, e revisione organografica dei genere di Diatomee stab. di Kützing (Venedig 1846). Seine erste größere Arbeit (1835) beschäftigte sich mit der Struktur des Stengels bei den Monokotylen.

W. Ruhland.

Mentschutkin
Nicolai.

Geboren am 24. Oktober 1842 in Petersburg, gestorben daselbst am 23. Januar 1907. Er war seit 1869 Professor an der dortigen Universität und gab längere Zeit das Journal der russischen chemischen Gesellschaft heraus. Seine Forschungen galten hauptsächlich der organischen Chemie, und zwar vorwiegend der Frage nach der Bildung von Estern und von Aminen und Amiden. Dieses Problem hat er in umfassender Weise studiert und seine Ergebnisse haben bleibenden Wert. Von seinen Schriften ist die über analytische Chemie auch in deutscher Uebersetzung erschienen und hat sich großer Beliebtheit erfreut.

E. von Meyer.

Mergel.

Der Ausdruck ist abzuleiten von Mark, Erdmark, weil schon seit alter Zeit zur Verbesserung des Ackerbodens benutzt. Es ist ein im wesentlichen aus kohlensaurem Kalk und Ton bestehendes Gestein (vgl. den Artikel „Gesteine. Technisch wichtige Gesteine").

Merian

Maria Sybilla.

Geboren am 2. April 1647 zu Frankfurt a. M.; gestorben am 13. Januar 1717 zu Amsterdam. Entstammte einer alten Künstlerfamilie in der Schweiz. Ihre erste Unterweisung in der Kunst bekam sie von ihrem Stiefvater Jacob Moreel, einem Blumenmaler, der die Fähigkeiten des Kindes bald erkannte. Später arbeitete sie bei Abraham Mignon und erlangte schon bald einen Ruf durch ihre besondere Art, die Blumen in ihrer Beziehung zu der Tierwelt; Schmetterlingen, Raupen, Schnecken usw. in Wasserfarben meist auf Pergament darzustellen. Sie lebte 14 Jahre in Frankfurt, ging dann nach Holland und von dort mit Unterstützung der holländischen Regierung nach Surinam, um die Verwandlung der dortigen Schmetterlinge zu beobachten und auch die zu ihrer Nahrung dienden Pflanzen festzustellen. Sie begnügte sich nicht damit, die Naturobjekte rein malerisch wieder zu geben, sondern vertiefte sich auch in die Naturwissenschaften und erlernte die lateinische Sprache, um ihren Studien wissenschaftlichen Wert in begleitenden Worten verleihen zu können. Von ihren zahlreichen Werken, zu denen sie die Kupfer meist selbst gestochen, sind zu nennen: Erucarum ortus, alimentum et paradoxa metamorphosis, 2 Bde., Nürnberg u. Frankfurt 1679 bis 1883; Metamorphosis insectorum Surinamensium Amsterdam 1705.

Literatur. *Allgem. Deutsche Biographie Bd. III, 1872.*

W. Harms.

Merrem

Blasius.

Geboren am 4. Februar 1761 zu Bremen; gestorben am 23. Februar 1824 zu Marburg. Er war 1781 bis 1784 Privatdozent in Göttingen, wurde dann Professor der Mathematik und seit 1794 auch der Kameralwissenschaften der Universität Duisburg. 1804 wurde er Professor in Marburg für Zoologie, Botanik und Volkswirtschaft. Er war selbst für die damalige Zeit ein sehr vielseitiger Mann, hat sich aber trotzdem um die Zoologie Verdienste erworben. Seine Arbeiten, anatomischen, besonders aber systematischen Inhalts über die Naturgeschichte der Vögel, noch mehr aber seine späteren Arbeiten über Systematik der Amphibien, erfreuten sich lange, noch bis in unsere Zeit hinein einer gewissen Geltung. Von seinen Abhandlungen seien erwähnt: Vermischte Abhandlung zur Tiergeschichte, Göttingen 1781; Versuch einer allgemeinen Geschichte der Vögel, 2 Bde., Leipzig 1787 bis 1788; Beiträge zur Geschichte der Amphibien, 2 Hefte, Leipzig 1790; Versuch eines Systems der Amphibien, Marburg 1820.

Literatur. *V. Carus, Geschichte der Zoologie, München 1872. — E. Korschelt, Ueber die Entstehungsgeschichte und weitere Entwickelung des Zool. Inst. der Univ. Marburg, Leipzig 1906.*

W. Harms.

Mersenne

Marin.

Geboren 1588 zu Soultière in Le Maine; gestorben 1648. Er wurde bei den Jesuiten in La Flèche erzogen und trat in den Orden der Minoriten ein. Mersenne hat sich auf fast allen Gebieten der Wissenschaft betätigt, in der Physik sind seine Arbeiten im wesentlichen akustische, er ermittelte die Gesetze der Saitenschwingungen.

Literatur. *Rosenberger, Gesch. d. Physik II, S. 93, Braunschweig 1884.*

E. Drude.

Mesozoen.

1. Einleitender Abschnitt. Kurzer historischer Ueberblick. Begriff der Mesozoen. 2. Die Organisation und der Entwickelungscyklus der Mesozoen: a) Die Rhombozoen. b) Die Plasmodiogenea. c) Die wahrscheinlich hierher gehörigen Organismen, deren Zeugungskreis nur teilweise bekannt ist: α) Buddenbrockia. β) Lohmannella. γ) Amoebophrya. δ) Salinella. d) Von einzelnen Autoren zu den Mesozoen gerechnete Formen aus anderen Tiergruppen: α) Haplozoon. β) Mesenchymia. γ) Pemmatodiscus. δ) Physemarien. ε) Siedleckia. 3. Systematik der Mesozoen. 4. Biologie.

1. Einleitender Abschnitt. Kurzer historischer Ueberblick. Begriff der Mesozoen. Unter dem Namen Mesozoen faßt man eine kleine Gruppe von mikroskopischen Tieren zusammen, die sich weder unter den Protozoen, noch unter den Metazoen ohne Zwang unterbringen lassen. Je nach der, bei verschiedenen Forschern sehr verschieden lautenden Definition der Mesozoen finden sich mehr oder weniger kleine Gruppen von niedrig organisierten vielzelligen Tieren in das Subregnum der Mesozoen einbezogen.

Der Name und Begriff Mesozoen wurde von Eduard van Beneden 1876 für die Ordnung der Dicyemiden geschaffen. Seine Definition betont hauptsächlich als Unterschied gegenüber den Protozoen ihre Vielzelligkeit, vermöge deren sie ein Individuum zweiter Ordnung bilden; gegenüber den Metazoen die geringe Anzahl der Zellen den Mangel differenzierter Organe und eines inneren Hohlraumes. Da jedoch van Beneden gewisse Entwickelungsstadien der Dicyemiden als durch Epibolie entstandene Gastrulae auffaßte, fand seine Auffassung bald Widerspruch. Jedoch blieb der Name Mesozoen bestehen und wurde nun von verschiedenen Forschern in

recht verschiedenem Sinne gebraucht. Metschnikoff (1881) und später Caullery und Mesnil (1901) verbanden mit dem Worte Mesozoen eine phylogenetische Auffassung: Ein Mesozoon stellte nach ihrer Ansicht ein wirkliches historisches Uebergangsglied zwischen Protozoen und Metazoen dar und mußte daher in gewissen Merkmalen den Weg, den nach ihrer Vorstellung die Metazoen bei ihrer Entstehung aus koloniebildenden Protozoen zurückgelegt hatten, erkennen lassen. Demgemäß spielte in ihrer Definition die intracelluläre Verdauung eine wesentliche Rolle. Eine mehr morphologische, hauptsächlich von M. Hartmann (1907) und E. Neresheimer (1904, 1908) vertretene Auffassung verzichtete auf eine Aussage über die eventuelle Eigenschaft der Mesozoen als Ahnen der Metazoen, sondern verglich nur ihre Organisationshöhe mit der der beiden hauptsächlichen Subregna des Tierreiches. Nach ihr erheben sich die Mesozoen über die Protozoen, auch die koloniebildenden, durch das Vorhandensein eines wirklichen Gewebes oder somatischen Blattes, das dem Ektoderm der höheren Tiere entspricht, unterscheiden sich aber von letzteren fundamental durch das Fehlen des zweiten Blattes, des Entoderms, sind also nicht auf die Gastrula, die gemeinsame Larvenform der Metazoen, zurückführbar. Diese Auffassung ist einerseits abhängig von der Bewertung der Gastrula für den Metazoenbegriff. Sie folgt Haeckels Lehre: „Der Inhalt des Metazoenbegriffes wird demnach ganz scharf und klar durch die ontogenetische Bildung der Gastrula (phylogenetisch Gastraea) bestimmt." (Systematische Phylogenie, Bd. II, S. 1 1894). Aehnliche Definitionen des Metazoenbegriffes finden sich z. B. in den Lehrbüchern der Zoologie von R. Hertwig und Claus-Grobben. Verwirft man, mit einigen Forschern, die Allgemeingültigkeit der Gastrulatheorie, so ändert sich natürlich der Metazoenbegriff und von seiner neuen Fassung hängt es ab, ob er die hier als Mesozoen bezeichneten Organismen einschließen kann. Andererseits ist die Richtigkeit der Auffassung von Hartmann und Neresheimer abhängig von einer bestimmten Fassung des Begriffes Gastrula: die echte Gastrula muß nach ihr nicht nur aus zwei Zellschichten bestehen, sondern diese müssen auch bestimmte physiologische Eigenschaften besitzen, nämlich die äußere Schicht soll ein echtes Ektoderm, die Innere ein echtes Entoderm darstellen, also die der Verdauung dienenden Elemente liefern. Läßt man diese auch von Metschnikoff und von Caullery und Mesnil formulierte Forderung fallen und sieht in jedem vorübergehend zweischichtigen Entwickelungsstadium eben wegen seiner Zweischichtigkeit eine echte Gastrula, so verliert damit die „morphologische" Auffassung ihre Berechtigung; die Mesozoen erweisen sich gleichfalls als auf die Gastrula zurückführbar, wie dies ja van Beneden angenommen hat. Dann sind sie logischerweise als niedrigst organisierte Metazoen, etwa Gastraeaden, aufzufassen, und die Aufstellung einer zwischen Protozoen und Mesozoen stehenden Gruppe ist unnötig. Neuerdings verfocht wieder V. Dogiel (1910) energisch die Vergleichbarkeit des Dicyemidenorganismus mit einer durch Epibolie entstandenen Gastrula. Einige andere Forscher, wie Roule (1898), Delage und Hérouard (1899), V. Dogiel (1910) verzichten auf eine Definition des Mesozoenbegriffes und wollen unter diesem Namen nur diejenigen, besonders niedrig organisierten Tiergruppen zusammenfassen, die nach dem gegenwärtigen Stande unserer Kenntnis weder bei den Protozoen noch bei einem der Stämme der Metazoen einordnen lassen. Es ist vielfach üblich und speziell für pädagogische Zwecke, also zur Vermeidung einer Ueberlastung der Lehrbücher mit allzu vielen Gruppennamen, wohl dienlich, in diesem Sinne alle in dem großen „Traité de Zoologie concrète" von Delage und Hérouard hier aufgeführten Formen als Mesozoen zusammenzufassen.

Eine letzte Gruppe von Forschern endlich rechnet die Mesozoen direkt zu den Metazoen, indem sie alle die Züge niedrigerer Organisation als durch Parasitismus sekundär entstanden zu erklären sucht. So erklärten Leuckart (1882) und Schauinsland (1883) die Mesozoen für geschlechtsreif gewordene Trematodenlarven, Pagenstecher (1887) und Braun (1893) faßten die damals bekannten Formen, die Dicyemiden und Orthonectiden als Mionelminthes zusammen und stellten sie an die Basis des Stammes der (Platt-) Würmer. Aehnlich Blanchard (1888), der sie als Aneuriens bezeichnete. Hatschek (1888) führte sie als Planuloidea in das System der Cnidarier ein, auf Grund der Aehnlichkeit der Orthonectiden und Dicyemiden mit der Planula, der charakteristischen Larve der Cnidarier; auch er betrachtet ihre niedrige Organisation als eine Folge der parasitischen Lebensweise. Der Name Planuloidea wurde als Bezeichnung für die Orthonectiden und Dicyemiden auch vielfach von Forschern, die nicht auf dem Standpunkte Hatscheks stehen, beibehalten. Bisher hat keine der im vorstehenden kurz skizzierten Meinungen ein entschiedenes Uebergewicht erringen können. Die Bemühungen Neresheimers, ein geordnetes System aufzustellen, sind an unserer bisher zu geringen Kenntnis mancher hierher gerechneten Formen, namentlich ihres Entwickelungszyklus, gescheitert. Denn wie bei vielen Protozoen, ist auch bei diesen Lebewesen ein Urteil über ihre systematische Zugehörigkeit ohne die vollständige Kenntnis aller Phasen ihres Lebenslaufes durch die verschiedenen Generationen nicht möglich. Aus diesem Grunde ist es auch unmöglich, bei der folgenden Besprechung der einzelnen Mesozoengruppen Morphologie, Physiologie und Entwickelungsgeschichte voneinander getrennt zu behandeln.

2. Die Organisation und der Entwickelungszyklus der Mesozoen. 2a) Die Rhombozoen. Die Rhombozoen sind die am längsten und genauesten bekannten Mesozoen. Sie wurden schon 1839 von Krohn in den Venenanhängen (Nieren) von Tintenfischen, wo sie parasitisch leben, entdeckt. Ihr Bau und ihre Entwickelungsgeschichte sind am besten an den Dicyemiden zu demonstrieren.

Den typischen Bau eines Dicyemids zeigen am besten die sogenannten n e m a t o - g e n e n Individuen, geschlechtslose Formen, die sich durch der Befruchtung nicht bedürftige Zellen, sogenannte A g a m e t e n, fortpflanzen. Das Tier besteht aus einer einzigen langgestreckten drehrunden inneren Zelle, der Axialzelle, und einer Umhüllung von Außenzellen, die platt und bewimpert sind. Einige besonders differenzierte Außen-

Fig. 1. Schematische Darstellung des Zeugungskreises der Dicyemiden. Nach Hartmann 1904. A. Junger Primärnematogener Agamont, KZ Kopfzellen, RZ Rumpfzellen, AZ axiale Zelle (Agametangium), n deren vegetativer Kern, sn sekundärer Kern der Axialzelle. B. Teil eines großen Agamonten in verschiedenen (in der Natur nicht gleichzeitig in einem Individuum vorkommenden) Zuständen, als primärnematogen (1—7), sekundärrhombogen (8—20), sekundärnematogen (20—25), n vegetativer Kern seiner Axialzelle, sn sekundäre vegetative Kerne derselben, 1—7 nematogener Zustand des Agamonten, 1 Gruppe von Agameten in verschiedenen Wachstumsstadien, bei 1a Bildung eines sekundären Kernes (Paranucleus), 1b Agamet in Teilung, 2 ausgebildeter Agamet, 3—5 Entwickelung der Agamonten aus Agameten, 3 Zweizellenstadium, 4 weiteres Furchungsstadium, 5 junger Agamont mit heteropoler Spindel in seiner Axialzelle, 6 junger Agamont nach der Teilung mit vegetativem Hauptkern und einer Agametocyte in Teilung, 7 junger Agamont mit 2 Agametocyten in seiner Axialzelle verläßt das Elterindividuum und wird entweder zu einem primärnematogenen Agamonten wie A oder zu einem primärrhombogenen Agamonten wie C, 8—20 sekundärrhombogener Zustand, 8 Gruppe von Agameten, die sich von Gruppe 1 herleiten, bei 8a, b, c verschiedene Stadien der Bildung sekundärer Kerne (Paranuclei), 9—11 Entwickelung der Weibchen und Bildung der Eier, 9 Zweizellenstadium, 10 junges Weibchen mit beginnender Eibildung in der Fortpflanzungszelle (Gametangium), auch die übrigen Furchungszellen (sonst somatische Zellen) werden zu Eiern, 11 ausgebildetes ♀ mit reicher Eibildung, umgeben von Spermatozoen (Sp.), 12, 13 Richtungskörperbildung und Befruchtung, 14 erste Furchungsspindel, 15—17 Entwickelung der ♂♂, die in der Regel ihren Ursprung von befruchteten Eiern (12—14), in seltenen Fällen auch noch direkt von Agameten nehmen, 15 Zweizellenstadium, 16 weiteres Stadium eines ♂ mit 4 zum Hoden werdenden Zellen im Innern, 17 fast ausgebildetes ♂, welches seinen Entstehungsort und den Wirt verläßt, um in anderen Wirtstieren Dicyemideneier zu befruchten (s. 13 und 18), 18—25 sekundärnematogener Zustand der Agamonten, 18 erschöpftes ♀, axiale Zelle, von der schließlich nur noch der Kern als Restkern in der Elteraxialzelle übrig bleibt, darum die von ihm zuletzt gebildete Generation von Eiern, umgeben von Spermatozoen (Sp.), 19 Richtungskörperbildung (hier noch nicht beobachtet), 20 Befruchtungsstadium, 21—25 Entwickelung der 1. Agamontengeneration aus befruchteten Eiern, die sich in gleicher Weise vollzieht wie die der späteren aus Agameten (vgl. 3—7), 25 junger Agamont der 1. Generation verläßt das großelterliche Tier, wahrscheinlich auch den Wirt, um in junge Cephalopoden einzudringen, wo er zu einem primärnematogenen Agamonten wird. C. Junger primärrhombogener Agamont, Ag Agamet, ♀ ganz junges reduziertes ♀.

Primärnematogen
A
Sekundärnematogen
B
Primärnematogen
B
Primärrhombogen
C
B
Sekundärrhombogen
Fig. 1.

zellen markieren den Kopfteil oder die „Kopfkappe“. Die Außenzellen des Rumpfteiles enthalten außer mit Flüssigkeit gefüllten Blasen körnige und kristalloide Bildungen, vermutlich Harnkonkremente aus der Nierenflüssigkeit des Wirtstieres. Diese Inhaltskörper können sich zu größeren Mengen ansammeln und die Zellen buckelförmig auftreiben; in anderen Fällen ist ihre Menge so groß, daß die sie enthaltenden Zellen wie Säcke an kurzen Stielen dem Körper anhängen (Warzenzellen; verrues; verruciform cells).

Die Dicyemiden erzeugen zweierlei sehr verschieden geformte Bruten die sogenannten „wurmförmigen“ und „infusorienförmigen“ Embryonen (daher der Name, von $\delta\iota$ = zwei und $\varkappa\upsilon\eta\mu\alpha$ = Keim). Die Muttertiere der wurmförmigen Embryonen heißen meist „nematogene“, die der infusorienförmigen „rhombogene Weibchen“. Der Zeugungskreis ist ein echter „primärer“ Generationswechsel, d. h. auf eine Anzahl ungeschlechtlich erzeugter (agametischer) Generationen folgen Weibchen, die gleichfalls auf agametischem Wege erzeugt, sich ihrerseits geschlechtlich, also durch echte Eizellen, fortpflanzen (Gamonten). Deren Nachkommen sind wieder Agamonten, d. h. ungeschlechtliche Individuen; der Zeugungskreis beginnt mit ihnen wieder von neuem.

Individuen, die erst wurmförmige, dann infusorienförmige, dann wieder wurmförmige Nachkommen erzeugen, heißen dementsprechend erst primärnematogen, dann sekundärrhombogen, dann sekundärnematogen. Der Zeugungskreis verläuft kurz folgendermaßen (Fig. 1).

Wir beginnen mit jungen, frisch in die Niere des Wirtstieres eingewanderten primärnematogenen Formen, die die erste agametische Generation darstellen. Ihre Axialzelle enthält zunächst einen einzigen Kern, der sich aber bald (eigentlich schon während der Embryonalentwickelung, also vor der Einwanderung in den neuen Wirt) durch eine heteropole Mitose in zwei ungleich große Kerne teilt. Der größere von diesen ist der dauernd vegetative Kern der Axialzelle, der andere ist der Kern der ersten agametischen Keimzelle, der Uragamete, aus der alle weiteren Agameten entstehen. Dieser Kern wird zur Zelle, indem er sich mit einer Region Plasma gegen das umgebende Plasma der Mutterzelle abgrenzt (endogene Zellentstehung). Durch äquale mitotische Teilung entstehen aus ihr viele weitere Keimzellen, die sich durch das Fehlen der für Eizellen, auch wenn sie sich ohne Befruchtung (parthenogenetisch) entwickeln, charakteristischen Reifungsteilungen als echte Agameten erweisen. Beim Längenwachstum entstehen durch Teilung des ersten vegetativen Kernes, zum Teil auch aus Chromatinanteilen, die die Agametenkerne ins Plasma der Mutterzelle ausstoßen (Chromidien), weitere vegetative Kerne der Axialzelle.

Die Entwickelung der Agameten beginnt nach einer Wachstumsperiode mit der Furchung, die zunächst zur Bildung von zwei größeren und zwei kleineren Blastomeren führt; hieraus entsteht bald ein morulaartiger Zellhaufen, bestehend aus einer größeren Zelle, der Axialzelle, die von den kleineren Außenzellen umgeben ist. Dies ist das von van Beneden als epibolische Gastrula gedeutete Stadium. Diese Deutung wurde, wie erwähnt, bestritten, da es sich hier nicht um eine Differenzierung von Entoderm und Ektoderm, sondern von Propagationszelle und Soma handelt. Die Axialzelle hat keine ernährende Funktion, kann also nicht als Entodermzelle angesprochen werden. Hartmann vergleicht daher die Mesozoen, statt mit der Gastrula, mit der Morula. Neuerdings bestreitet V. Dogiel die Richtigkeit dieses Arguments, da die Axialzelle auch der Ernährung der in ihrem Innern gebildeten Keimzellen und Embryonen dienen. Dem kann jedoch entgegengehalten werden, daß es sich hier nicht um Verdauung, sondern lediglich um Nahrungstransport handelt. In jedem Keimepithel müssen Zellen diese Funktion ausüben, ohne dadurch entodermalen Charakter anzunehmen.

Schon auf diesem Stadium beginnt der Embryo mit der Bildung einer neuen Agametengeneration. Seine eigene fernere Entwickelung besteht im Längenwachstum der Axialzelle, Vermehrung der Außenzellen und Differenzierung der Kopfkappe. Das neugebildete agametische Tier verläßt das Muttertier, dem es jetzt völlig gleicht, indem es sich aus der Axialzelle und durch die Außenzellen herausbohrt (Fig. 1 B 7). Es schwimmt nun eine Zeitlang frei in der Nierenflüssigkeit umher, um sich dann festzusetzen, indem es sich mit der Kopfkappe zwischen die Epithelzellen der Venenanhänge einzwängt. Auf diese Weise entsteht eine ganze Reihe von agametischen Generationen, die zur Verbreitung der Infektion in den Nieren des Wirtstieres dienen.

Wenn durch reichliche Infektion die Ernährungsbedingungen für die Parasiten schlechter werden, so erzeugen die Agameten in ihrer Axialzelle nicht mehr weitere Agamonten, sondern Gamonten, und zwar zu erst Weibchen, die sogenannten Germogene oder Infusorigene. Diese weiblichen Tiere unterscheiden sich von den Agamonten zunächst dadurch, daß sie die mütterliche Axialzelle nicht verlassen, sondern in ihr liegen bleiben. Da somit jede einzelne Zelle des Germogens aus der umgebenden Mutter-

zelle Nahrung aufnehmen kann, wird ein umgebendes Soma, das für Fortbewegung und Ernährung Sorge zu tragen hätte, unnötig, und es tritt der höchst merkwürdige Fall ein, daß sämtliche Somazellen des Individuums, also die den Außenzellen der Agamonten entsprechenden Zellen, zu Eiern werden. Dieser Fall ist deshalb besonders interessant, weil er die besonders von Weismann auf Grund theoretischer Erwägungen verfochtene Ansicht, daß zwischen generativem und somatischem Plasma ein prinzipieller Gegensatz bestehe, widerlegt. Die Embryonalentwickelung des Germogens erfolgt ähnlich wie die der Agamozoen. Im morulaähnlichen Stadium mit wenigen Zellen beginnt schon die innere, also die Axialzelle, die sehr rasch wächst, mit der Bildung von Fortpflanzungskernen. Der erste Kern, der durch inäquale Teilung vom vegetativen Kern abgespalten wird, umgibt sich auch hier endogen mit Plasma und bildet so die Ureizelle. Aus ihr gehen durch mitotische Teilung die Eizellen hervor, die zunächst die ganze Axialzelle des Germogens erfüllen. Die Eizellen werden dann ins Plasma der mütterlichen Axialzelle ausgestossen, und zwar bilden ihre erste Generation die Außenzellen des Germogens; sie werden ersetzt durch eine weitere Generation von Eizellen, die zunächst die Axialzelle wie Außenzellen umgeben, zur doppelten Größe der Agameten heranwachsen und schließlich wie die erste Generation ausgestoßen werden. So folgt eine Eigeneration der anderen, bis zur völligen Erschöpfung des Germogens und seiner Auflösung. In der Axialzelle des sekundärrhombogenen Muttertieres machen die Eizellen zunächst die typischen Reifungsteilungen (Ausstoßung der beiden Richtungskörper), durch, werden dann befruchtet und entwickeln sich fast immer zu männlichen Individuen (infusorienförmigen Embryonen). Das Sperma zur Befruchtung der Eizellen stammt immer von männlichen Tieren, die aus ihrem ursprünglichen Wirt ins Meerwasser aus- und in einen neuen Wirt eingewandert sind.

Das männliche Dicyemid oder der infusorienförmige Embryo ist klein und annähernd birnförmig gestaltet; das zugespitzte Ende ist das Hinterende. Die innere Schicht, die der Axialzelle entspricht, besteht aus sechs Zellen, davon zwei Nährzellen und vier Ursamenzellen, die die Spermatozoen liefern. Die sechs Axialzellen, die sogenannte „Urne", stellen also den Hoden des Tieres dar. Die Außenzellen sind auch hier bewimpert; zwei derselben am vorderen Pol enthalten je einen stark lichtbrechenden Körper, vielleicht ein primitives Sehorgan.

Nach der Produktion einer großen Anzahl männlicher Tiere wird das bisher sekundärrhombogene Tier sekundärnematogen; d. h. die letzten Eigenerationen, deren einzelne Eizellen viel kleiner bleiben, liefern nach der Befruchtung wieder Tiere, die vollständig den wurmförmigen, ungeschlechtlich erzeugten Individuen gleichen. Sie scheinen sich von jenen nur dadurch zu unterscheiden, daß sie, ebenso wie die männlichen Tiere, den Aufenthalt in Meerwasser ertragen, also befähigt sind, die Infektion auf ein neues Wirtstier zu übertragen. Diese geschlechtlich erzeugten, aber sich agametisch fortpflanzenden Individuen sind es, von denen wir bei der Besprechung des Zeugungskreises ausgegangen sind, die erste Agamozoengeneration.

Das Wenige, was wir von dem Zeugungskreis der Heteronectiden wissen, spricht dafür, daß er prinzipiell ebenso verläuft wie bei den Dicyemiden. Auch hier sind nematogene und rhombogene Individuen bekannt; die rhombogenen zeigen die Besonderheit, daß sie manchmal zu plasmodienartigen Kolonien zusammentreten.

2b) Die Plasmodiogenea. Wie unter den Rhombozoen die Dicyemiden, so bilden unter den Plasmodiogenea die Orthonectiden eine lange bekannte und gut erforschte Gruppe, deren Organisation und Entwickelungskreis hier kurz geschildert sei.

Auch die Orthonectiden zeigen einen primären Generationswechsel. Die Agamozoen, die mit den wurmförmigen Agamonten der Dicyemiden direkt zu vergleichen sind, stellen hier Plasmodien, d. i. vielkernige amöboide Gebilde dar, die als Parasiten in den verschiedensten Organen mariner wirbelloser Tiere angetroffen werden. Sie vermehren sich durch Zerfall (vegetative Fortpflanzung). Unter ihren zahlreichen Kernen befinden sich jedenfalls auch solche, die die rein vegetativen Funktionen des Plasmodiums beeinflussen; jedoch sind sie von den Fortpflanzungskernen nicht zu unterscheiden. Diese letzteren bilden, wie bei den Dicyemiden, in dem sie sich mit einer Plasmaportion umgeben und gegen das Plasma des Muttertieres abgrenzen, die Agameten. Aus ihnen entstehen die Geschlechtstiere, und zwar sind bei einzelnen Arten die Plasmodien diözisch, d. h. sie bringen nur männliche oder nur weibliche Individuen hervor; in anderen Fällen entstehen beide Formen nebeneinander im selben (monözischen) Plasmodium. Bei wenigen Arten sind die Geschlechtstiere hermaphrodit.

Die Agameten, die sich auch hier wieder durch den absoluten Mangel an Reifungsvorgängen als solche erweisen, liefern wieder durch Teilung ein morulaartiges Stadium, in dem sich dann Außen- und Innen(Axial-)zellen differenzieren. Aus ihnen entstehen

die Gamozoen, die in ihrem Bau eine große prinzipielle Aehnlichkeit mit den Dicyemiden besitzen. Der Hauptunterschied besteht in der viel größeren Zahl der Außenzellen, die in vielen Ringeln angeordnet sind und drei verschiedene Regionen erkennen lassen, und in der großen Anzahl der Axialzellen. Diese sind die Genitalzellen, also Eier- bezw. Außenzellen gleichen und hier die Geschlechtszellen verdrängen. Von den Forschern, die die Planuloidea als durch Parasitismus in ihrer Organisation vereinfachte Würmer betrachten, wird dieses Gebilde als Darmrudiment gedeutet.

Die Männchen sind meist kleiner als die Weibchen; die Anordnung der Außenzellen

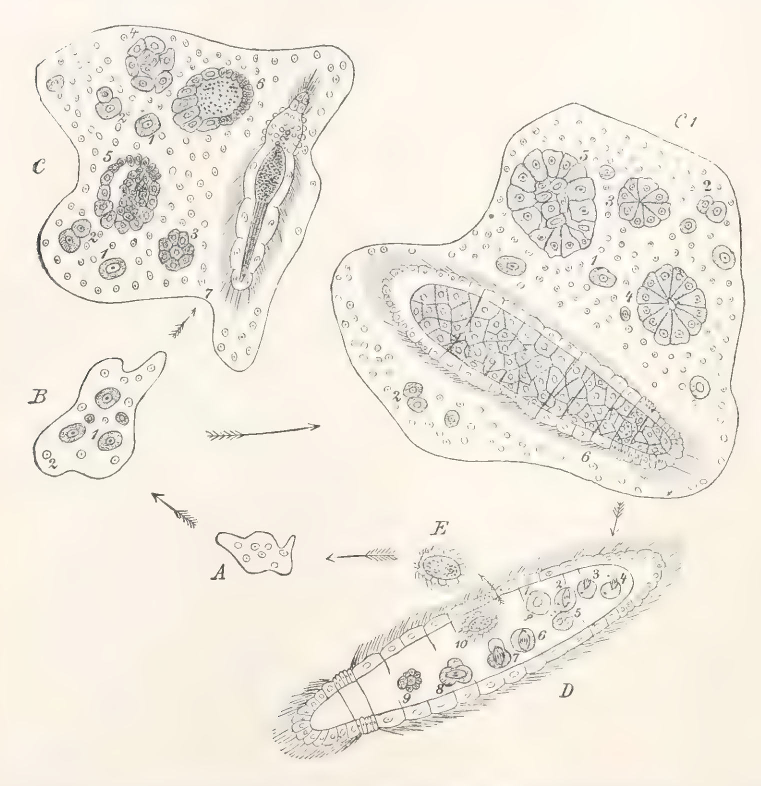


Fig. 2. Schematische Darstellung des Zeugungskreises einer diöcischen und gonochoristischen Rhopalura-Art. Kombiniert nach Abbildungen und Angaben von Giard, Julin, Caullery und Mesnil. Aus Neresheimer (1908). A. Junges Plasmodium (Agamont) vermehrt sich innerhalb des Wirtes durch Zerfall. B. Aelteres Plasmodium mit einzelnen Agameten (1) und vegetativen Kernen (2). C. Entstehung des ♂ in einem Plasmodium. 1 Agamet, 2 Zweizellenstadium, 3, 4, 5 weitere Furchungsstadien (Morulae), 6 junges ♂, die inneren Zellen werden zu Samenmutterzellen, 7 fertiges ♂, das das Mutterplasmodium und das Wirtstier verlassen wird, um im freien Meerwasser ein ♀ zu befruchten, C_1 Entstehung eines ♀ in einem Plasmodium. 1 Agamet, 2 Zweizellenstadium, 3 4 blastula-artige Furchungsstadien, 5 weiteres Stadium mit Ureiern im Innern, 6 reifes ♀ vor dem Verlassen des Mutterplasmodiums und des Wirtstieres. D. Befruchtetes ♀. 1 Ei und Spermatozoon im Moment vor der Befruchtung, 2, 3 Ei mit eingedrungenem Spermatozoon und erster Richtungsspindel, 4 zweite Richtungsspindel, 5 reifes Ei mit männlichem und weiblichem Vorkern, 6 erste Furchungsspindel, 7 inäquale erste Furchungsteilung, 8, 9 weitere Furchungsstadien, 10 bewimperte Larve im Begriff durch die Geburtsöffnung auszuschlüpfen. E. Bewimperte Larve, die in einen neuen Wirt eindringen wird, um sich auf noch unbekannte Weise in ein Plasmodium zu verwandeln.

Samenmutterzellen, sie bilden je nach der Art einen kompakten Haufen oder eine, auch zwei Längsreihen. Die einschichtig um diesen Komplex angeordneten Außenzellen sind nach Segmenten oder Ringen angeordnet. Meist ist ein vorderer, aus wenigen Segmenten bestehender Abschnitt mit nach vorn gerichteten Wimpern, dann ein kurzer unbewimperter, und hierauf der längste Teil des Körpers mit nach hinten gerichteten Wimpern zu unterscheiden. In der vorderen Körperhälfte des Weibchens befindet sich eine Geschlechtsöffnung; am vorderen Pole liegt ein Pfropf von Zellen, die völlig den zeigt keinen wesentlichen Unterschied. Zwischen Hoden und Außenzellen ist eine Schicht eingelagert, die aus längsgerichteten Fibrillen besteht und als Bündel am Vorderende, bei manchen Arten auch am Hinterende befestigt ist. Viele Autoren deuten diese Fibrillen als Muskelelemente.

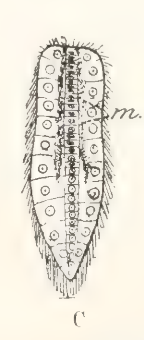
Wenn diese Gamozoen einen gewissen Reifegrad erlangt haben, so verlassen sie das mütterliche Plasmodium und das Wirtstier; die Befruchtung erfolgt im Meerwasser. Die Männchen hängen sich mit ihren Wimpern an die der Weibchen an; die reifen Samenelemente dringen wohl durch die Geschlechts-

öffnung in den Körper des Weibchens und hier in die Eier ein, die darauf zunächst die Reifungsteilungen durchmachen, worauf die Vereinigung der Geschlechtskerne erfolgt. Die Furchung führt zur Entstehung eines morulaähnlichen Stadiums, darauf zur Bildung einer bewimperten zweischichtigen Larve. Die Außenzellen sind in flacher Lage angeordnet und umschließen einen kompakten Haufen undifferenzierter Binnenzellen. Die Larven verlassen das absterbende Muttertier durch die Geschlechtsöffnung, um im freien Meerwasser umherzuschwärmen. Bei den Larven gewisser Arten findet sich am Vorderende ein stark lichtbrechendes, aus mehreren Zellen bestehendes Gebilde, das einen Bohrapparat darzustellen scheint. Diese Larven dringen wieder in ein neues Wirtstier ein, bei Ophiuren z. B. durch die Genitalspalten, setzen sich in den Geweben fest und wandeln sich auf noch nicht näher erforschte Weise in kleine, ein- bis vierkernige Plasmodien um. Durch vegetative Teilung und amöboide Wanderung dieser Plasmodien breitet sich die Infektion im Wirtstier aus. Einzelne Kerne bilden sich nun zu Fortpflanzungskernen um, umgeben sich mit Plasma und bilden so Agameten, aus denen morulaartige Zellhaufen entstehen. Zunächst lösen sich von diesen Zellansammlungen einzelne Zellen los und beginnen dieses Spiel von neuem. Aus einzelnen Agameten entstehen schließlich männliche Tiere, während in anderen Plasmodien sich die ganzen Morulae direkt in Weibchen umwandeln. Einzelne Keimzellen bleiben immer zurück und liefern neue Agametengenerationen. Vegetative Kerne entstehen in den Plasmodien durch multiple Teilung von Agametenkernen.

Eine offenbar den Orthonectiden nahe verwandte Gruppe, die Heteronectiden, ist noch wenig bekannt. Der einzige Repräsentant dieser Gruppe ist Pelmatosphaera polycirri Caullery und Mesnil. Das Plasmodium, das sich in der Leibeshöhle eines polychäten Wurmes befindet, ist hier kugelig und von einer derben Hülle umschlossen. In ihm entstehen, wie bei den Orthonectiden, aus Agameten Individuen, die aus einer Schicht bewimperter, in Ringen angeordneter Außenzellen und einem axialen Strang von Binnenzellen bestehen. Zwischen beiden Lagen befinden sich vier Streifen von (Muskel-?)Fibrillen. Die Entdecker dieses Organismus (Caullery und Mesnil) halten die Binnenzellen für Agameten, was einen wesentlichen Unterschied gegenüber den Orthonectiden bedeuten würde; jedoch ist die weitere Entwickelung dieser Stadien noch völlig unerforscht; die auffallende Aehnlichkeit dieser Formen mit den Gamozoen der Orthonectiden in ihrer Entstehung und in ihrem Bau macht es wahrscheinlich, daß sich bei der späteren Entwickelung die Binnenzellen als Geschlechtszellen erweisen werden.







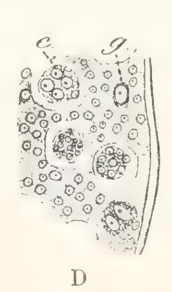


Fig. 3. Pelmatosphaera polycirri. Nach Caullery und Mesnil. A Sphärischer Körper (Aequivalent des Plasmodiums). B Ausgeschlüpftes Tier nach dem Leben. C Ausgeschlüpftes Tier im optischen Schnitt; in der Mitte der innere Zellstrang. m Muskelelemente. D Schnitt durch einen Teil einer Sphäre; g Agameten, c Furchungsstadien.

Sämtliche genauer bekannten Planuloidea, d. i. die Dicyemiden und die Orthonectiden, zeigen also einen primären Generationswechsel. Mit Recht wies Hartmann darauf hin, daß dieses Verhalten unter allen vielzelligen Tieren einzig dasteht und sonst nur bei Protozoen vorkommt. Denn alle bei Metazoen beobachteten Formen eines Generationswechsels sind prinzipiell von diesen Vorgängen unterschieden: der Generationswechsel der Metazoen, wie z. B. der der Hydrozoen, ist ein sekundärer; d. i. es wechseln Generationen, die durch vegetative Fortpflanzung entstehen, mit geschlechtlich erzeugten ab. Oder es handelt sich, wie z. B. bei den Blattläusen, um Heterogonie, d. h. die Generationen entstehen abwechselnd aus unbefruchteten und aus befruchteten Eiern, also stets aus Sexualzellen. Agamocytogonie, d. i. Fortpflanzung durch ungeschlechtliche Keimzellen, kommt

bei Metazoen nie vor. Der einzige Fall, in dem dies bisher von vielen Forschern angenommen wurde, die Fortpflanzungszellen der Sporocysten bei den Trematoden, hat sich neuerdings endgültig als echte Parthenogenese erwiesen. Wie Cary (1910) nachgewiesen hat, kommen bei diesen Zellen die typischen Reifungsteilungen vor; sie sind also Eier. Die Definition von Hartmann (1907) und Neresheimer (1908) scheint also, wenigstens für die Planuloidea, zu Recht zu bestehen: „Morulaartige Organismen mit nur einer somatischen Zellschicht. (also nicht auf die Gastrula zurückführbar) und mit primärem Generationswechsel."

2c) Die wahrscheinlich hierher gehörigen Organismen, deren Zeugungskreis nur teilweise bekannt ist. *α*) Buddenbrockia. Besonders interessant als einziger bisher bekannter Parasit eines Süßwasserorganismus ist die 1910 in der Leibeshöhle von Bryozoen entdeckte Buddenbrockia plumatellae O. Schröder. Das wurmförmige langgestreckte Tier besteht aus zwei Zellschichten, deren äußere epithelartig angeordnet ist. Die Zellen sind wimperlos. Die innere Zellschicht ist meist anfangs gleichfalls epithelartig um einen inneren Hohlraum angeordnet.

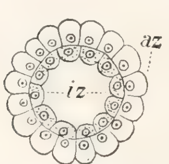


Fig. 4. Querschnitt durch ein junges Exemplar von Buddenbrockia. Nach O. Schröder. az Außenzellen. iz Innenzellen.

Diese Innenschicht verändert sich auf späteren Stadien: ein Teil bildet sich zu vier größtenteils aus Längsmuskelzellen bestehenden Längswülsten um, zwischen ihnen sind noch vier Längsstreifen, aus besonders strukturierten Zellen unbekannter Funktion bestehend, zu erkennen. Die Muskelwülste sind anfangs an ihrer Innenfläche mit Oogonien besetzt, die sich später loslösen und als Oocyten frei in der Körperhöhle schwimmen. Eine Richtungsteilung ist nachgewiesen. Am Vorderende scheinen eine Anzahl oocytenartiger Zellen zu Samenmutterzellen zu werden. Aus den Eiern entstehen kleine Embryonen, deren Außenzellen zwei bis vier Binnenzellen umschließen. Am Vorderende enthalten einige große Außenzellen stark lichtbrechende Differenzierungen, die an die erwähnten Organe der Dicyemiden-Männchen erinnern. Auch sonst ist der ganze Embryo dem Dicyemiden-Männchen recht ähnlich. Später entwickeln sie sich zu kompakten, morulaähnlichen Larven mit einer Schicht von Außenzellen und zahlreichen Innenzellen. Sie heften sich zunächst, als keulenförmige Körper, mit dem „Stielende" an der Leibeshöhlenwand des Wirtes an, werden mit zunehmender Differenzierung spindelförmig und fallen ab, um frei in der Leibeshöhle des Wirtes zu liegen. Der Modus der Uebertragung ist noch unbekannt.

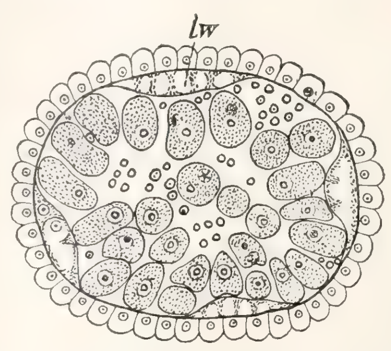


Fig. 5. Querschnitt durch ein älteres Exemplar von Buddenbrockia mit Eizellen und Richtungskörpern. lw = Längswulst. Nach O. Schröder.

Die Organisation dieses Tieres erinnert stark an die Geschlechtsformen der Orthonectiden; da vom Entwickelungskreis offenbar nur ein kleiner Teil erforscht ist, kann über ihre nähere oder fernere Verwandtschaft zu dieser Gruppe noch nichts Sicheres ausgesagt werden. Ganz neuerdings (1912) neigt der Entdecker, O. Schröder, der Ansicht zu, daß es sich um stark rückgebildete Nematoden handle, während Braem (1911) den Organismus für eine Trematoden-Sporocyste hält.

β) Lohmanella.[1]) Eine gleichfalls vielfach an die Orthonectiden erinnernde Form ist die Gattung Lohmanella Neresh., Entoparasiten von Appendicularien. Auch hier ist nur ein Teil des Entwickelungszyklus bekannt. Der Parasit besteht aus einem amöboiden, viel kernigen „Kopfstück", das mit pseudopodienartigen Fortsätzen die inneren Organe des Wirtstieres umklammert hält und offenbar aussaugt. Eine vom Hinterrande des Kopfstückes ausgehende, kernlose Membran umgibt dieses sackartig. Im Innern dieser Membran entsteht durch Sprossung vom Kopfstück aus ein hohler Zapfen, der aus einer Zellschicht besteht, sich segmentiert und die einzelnen, sich zu einschichtigen Hohlkugeln (Blastoformien) abrundenden Segmente durch die gesprengte Hüllmembran ausstößt. Die Blastoformien gelangen ins freie Meer; sie stellen offenbar (wohl vegetative?) Fortpflanzungskörper dar, doch ist ihr ferneres Schicksal völlig unbekannt. Die jüngsten bekannten Stadien des Para-

[1]) Ganz neuerdings (1912) wurde der Name Lohmannella durch den Namen Neresheimeria Uebel ersetzt.

siten bestehen aus der plasmodialen Kopfkappe, in die die wenigzellige Anlage des späteren Zapfens bereits eingeschlossen ist.

γ) Amoebophrya. Gewisse Aehnlichkeiten mit Lohmanella zeigt ein merkwürdiger Parasit mehrerer mariner Protozoen, die Gattung Amoebophrya Köppen. Amoebophrya besteht aus einem einschichtigen Schlauch, dessen Kerne parallel zu einer bewimperten Spiralfurche stehen. Im Wirtstier liegt dieser hohle Schlauch handschuhfingerartig eingestülpt, so daß er zwei Zellschichten bildet; beim Ausschlüpfen durchbricht das innere Ende die äußere Schicht, so daß die Spitze des inneren Keglse zum Vorderende des Tieres wird. Das Vorderende ist massiv, das innere Plasma aber kernlos, es enthält an seiner Basis einen eigenartig strukturierten Zapfen.

Die Zahl der Kerne des Organismus ist sehr unbeständig; selbst einkernige Stadien sind bekannt geworden. Offenbar ist dieser Schlauch, der nach dem Ausschlüpfen sich lebhaft im Meerwasser bewegt, ein Fortpflanzungskörper, vielleicht analog den Blastoformien der Lohmanella. Manchmal zerfällt er nach dem Ausschlüpfen in mehrere Segmente. Von manchen Forschern wird er als Schwärmer einer Acinete, also eines Protozoons, gedeutet, doch spricht die epithelartige Struktur des Schlauches dagegen. Es scheint sich um eine einzige Zellschicht zu handeln.

Mit einiger Wahrscheinlichkeit wird als ein anderes Stadium desselben Organismus der sogenannte Kugelhaufen gedeutet. der sich oft in denselben Wirtstieren findet. Er besteht aus einem Plasmodium, in dem, wie bei den Orthonectidenplasmodien, endogen Zellen (Agameten ?) entstehen, die dann ins Plasma des Wirtstieres überwandern. Sollte sich der Zusammenhang zwischen beiden Bildungen erweisen, so wären damit viele Vergleichspunkte mit den Orthonectiden gegeben; zur Zeit aber wissen wir auch über diese Form noch zu wenig, um sie mit einiger Wahrscheinlichkeit klassifizieren zu können.

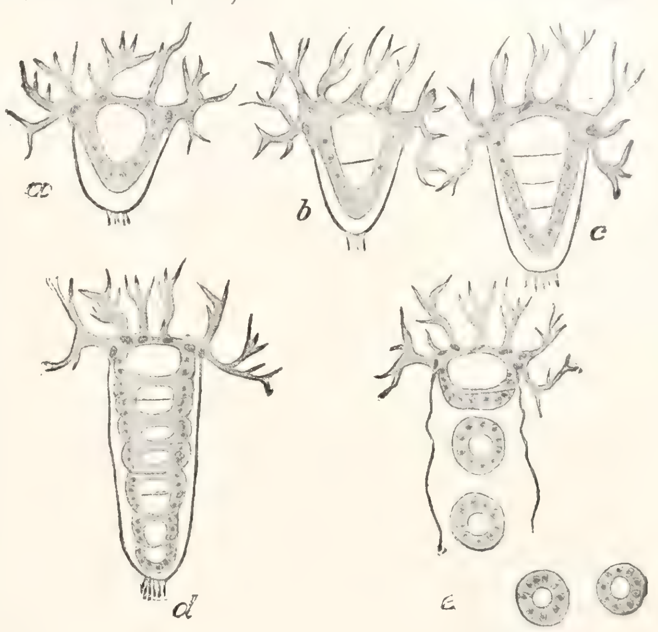


Fig. 6a—e. Lohmannella catenata. Nach Neresheimer. Schema der Segmentation und Ausstoßung der Blastoformien.

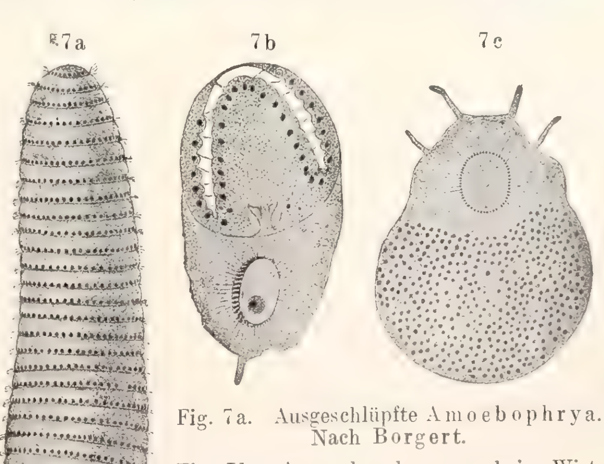


Fig. 7a. Ausgeschlüpfte Amoebophrya. Nach Borgert.

Fig. 7b. Amoebophrya noch im Wirt, Längsschnitt. Nach Borgert.

Fig. 7c. Schnitt durch den „Kernhaufen“ in einer Sticholonche. Nach Borgert.

δ) Salinella. Eine höchst merkwürdige Form, die mit keiner der anderen bekannten Mesozoenarten in näheren Zusammenhang gebracht werden kann, ist Salinella salve Frenzel, für die

Delage und Herouard eine eigene Klasse der Mesocoelia geschaffen haben. Der Organismus wurde nur einmal von Frenzel (1891) in einer Lösung von Salinensalz in Argentinien beobachtet. Das wurmförmige, etwa 2 mm lange Tier besteht aus einer einzigen Zellschicht, die einen verdauenden Hohlraum umschließt. Die Bauchseite ist flach und bewimpert, die gewölbte Rückenseite trägt einzelne borstenartige Cilien. Der Mund liegt am Vorderende, etwas ventral verschoben, und ist von langen geißelförmigen Cilien umgeben; der After

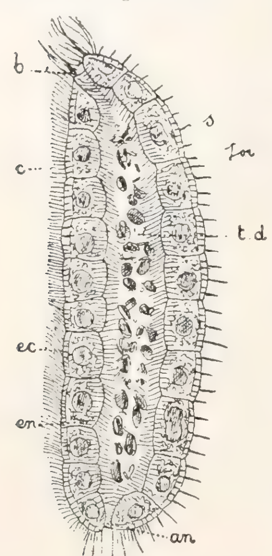


Fig. 8. Salinella salve. Nach Frenzel aus Delage und Hérouard. an After, b Mund, c Wimpern der Ventralfläche, ec Alveolarsaum der Zellen, en Entoplasma der Zellen, f größere den Mund umgebende Wimpern, s borstenartige Wimpern der Dorsalseite, td Darmlumen.

ist terminal. Die dem Hohlraum zugewandte Fläche der Zellen ist gleichfalls bewimpert. Die Tiere vermehren sich durch Zweiteilung mit nachfolgender Regeneration des Vorder- bezw. Hinterendes.

Nach Frenzel soll auch eine geschlechtliche Vermehrung stattfinden; zwei Individuen sollen sich gemeinsam encystieren und in die einzelnen Zellen zerfallen. Je zwei Zellen verschiedener Provenienz sollen zusammen verschmelzen und eine infusorienartige Larve liefern, aus der durch endogene Zellknospung das neue Tier entsteht. Jedoch ist es sehr wahrscheinlich, daß Frenzel hier verschiedene gar nicht zusammengehörige Stadien verschiedener Organismen zusammen kombiniert hat. Bevor das Tier nicht wiedergefunden worden ist, können nur die oben beschriebenen erwachsenen Stadien und ihre Zweiteilung anerkannt werden.

2d) Von einzelnen Autoren zu den Mesozoen gerechnete Formen aus anderen Tiergruppen. α) Haplozoon. V. Dogiel hat 1906 einen eigenartigen Parasiten im Darm von Anneliden entdeckt, den er mit Lohmannella zu einer Gruppe der Catenata vereinigt. Haplozoon besteht zunächst aus einer sogenannten Kopfzelle, die vermittels eines Pseudopodienbüschels an der Darmwand des Wirtstieres befestigt ist; außerdem weist sie noch als besondere Differenzierungen Längsmuskelfibrillen und ein vorstoßbares Stilett (einige Arten noch eine Anzahl von Reservestiletts) auf. Durch Teilung entstehen am Hinterende neue Zellen, die in langer Kette mit dem Kopfstück verbunden bleiben und Fortpflanzungszellen, vermutlich Gametocyten, darstellen. Die hintersten Zellen werden jeweils, meist in Gruppen von je zweien, abgestoßen und gelangen aus dem Darm des Wirtstieres ins Freie. Ihr ferneres Schicksal ist unbekannt. Bei den verschiedenen Arten bilden die der Kopfzelle anhängenden Fortpflanzungszellen entweder eine einfache Reihe, oder eine einschichtige Fläche, bei der immer die folgende Reihe doppelt so viel Zellen enthält als die vorhergehende, oder endlich eine kompakte, keulenförmige Masse. Dogiel rechnet den Organismus auf Grund dieser Vielzelligkeit zu den Mesozoen; mit Lohmannella vergleicht er ihn wegen der Befestigung der Kopfzelle durch Pseudopodien und wegen der Abstoßung der Gruppen von je zwei Fortpflanzungszellen, die er den Blastoformien gleichsetzt. Dogiel selbst weist eingehend eine ganze Anzahl von Vergleichspunkten zwischen Haplozoon und gewissen parasitischen Flagellaten (Peridineen: Gymnodinium pulvisculus Pouchet, Apodinium mycetoides Chatton) nach. So erinnert vor allem die eigenartige Kernteilungsfigur an Flagellaten; die Befestigung am Wirtstier vermittels eines pseudopodialen Stieles, die Differenzierung in somatische, der Nahrung und Befestigung dienende vordere Zelle und am Hinterende abgeschnürte Fortpflanzungszellen und einige andere Merkmale stellen auffallende Aehnlichkeiten dar. Dogiel selbst ist der Meinung, daß Haplozoon von peridineenartigen Formen abzuleiten ist; jedoch zählt er diese Gattung wegen ihrer Vielzelligkeit dennoch den Mesozoen zu. Er übersieht jedoch, daß die Vielzelligkeit allein nicht genügen kann, um eine Form von den Protozoen abzutrennen. Wäre das der Fall, so müßten von den verschiedensten Protozoengruppen einzelne Formen ausgeschaltet und den vielzelligen Tieren zugerechnet werden,



Fig. 9. Haplozoon armatum. Nach Dogiel. Aelteres Exemplar. st vorgestoßenes Stilett, d Dorsalseite, v Ventralseite. Am Ende zur Ablösung reife Gruppen von Fortpflanzungszellen.

wie dies z. B. A. Stolc (1898) mit der den Myxosporidien nahestehenden Gruppe der Actinomyxidien versucht hat; ja die Myxosporidien selbst könnten in diesem Falle nicht mehr den Protozoen zugerechnet werden. Der Unterschied, der Meso- wie Metazoen von den Protozoen scharf scheidet, ist ihre Eigenschaft als echte Heteroplastiden, d. h. als Organismen, die wenigstens ein echtes Gewebe, ein somatisches Blatt, besitzen. Als solches aber kann die Anhäufung von Fortpflanzungszellen bei Haplozoon unmöglich gelten. Daß sich bei Apodinium mycetoides die aufeinander folgenden Generationen von Gametocyten rasch von der Kopfzelle ablösen, während sie bei Haplozoon längere Zeit mit ihr und untereinander verbunden bleiben, ist ein recht sekundärer Unterschied, der eine Einreihung der beiden Gattungen in verschiedene Typen des Tierreiches gewiß nicht rechtfertigen kann. Allerdings ist Dogiels Auffassung vom Mesozoenbegriff eine völlig andere, als die hier vorgetragene; er sieht in den Mesozoen eine Sammelgruppe für alle zurzeit nicht anders zu klassifizierenden niedersten Organismen und hält eine schärfere Definition, wie z. B. die von Hartmann und Neresheimer versuchte, für undurchführbar.

β) Mesenchyma. In dieser Gruppe vereinigten Delage und Hérouard zwei bis vor kurzem rätselhafte Organismen, Trichoplax adhaerens F. E. Schulze und Treptoplax reptans Monticelli. Dies sind in Seewasseraquarien gefundene flache, amöboide bewegliche Scheiben, deren Körper aus drei Gewebslamellen ohne einen dazwischen liegenden Hohlraum besteht. Die dorsale und die ventrale Schicht sind Geißelepithel, dazwischen liegt die mittlere, aus mehreren Lagen von Zellen bestehende Schicht, die verschiedene Einschlüsse enthält. Die Organismen können sich frei schwimmend oder auf der Unterlage gleitend bewegen; sie pflanzen sich durch Zweiteilung fort. 1907 wurde der lebhaften Diskussion über die Stellung der Mesenchymia zu den Mesozoen ein Ende gemacht durch die Entdeckung von Krumbach, daß Trichoplax in den Entwickelungskreis der Hydromeduse Eleutheria Krohni gehört; er entsteht aus der Planula dieser Meduse. Ob er ein normales Stadium oder einen paranomal entwickelten Organismus darstellt, ist noch nicht entschieden.

γ) Pemmatodiscus. Dieser Organismus wurde von Monticelli 1895 in der Meduse Rhizostoma pulmo gefunden. Er hat die Form einer typischen Gastrula, besitzt aber die Fähigkeit amöboider Bewegung und der Zweiteilung, wobei die Teilungsachse durch den Urmund geht. Aller Wahrscheinlichkeit handelt es sich aber um ein Larvenstadium eines höheren Tieres. Jedoch müßte Pemmatodiscus socialis, auch wenn er als selbständiger Organismus erwiesen wäre, nicht unter die Mesozoen, sondern als typische Gastraeade unter die Metazoen gerechnet werden.

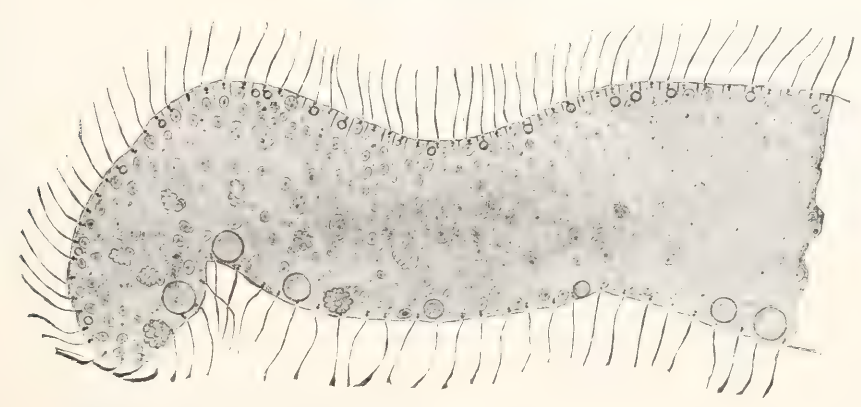


Fig. 10. Teil eines Querschnitts durch Trichoplax adhaerens. Nach Stiasny

δ) Physemarien. Diese Tiergruppe, die in ihrem Bau den einfachsten Schwämmen, den Asconen, sehr ähnlich ist, unterscheidet sich von diesen hauptsächlich durch den Mangel der Dermalporen. Doch gibt Haeckel (1889) sogar zu, daß er an seinem Material die Poren übersehen haben könnte. In diesem Falle wären die Physemarien, die von Delage und Hérouard zu den Mesozoen gestellt wurden, als einfachste Schwämme zu betrachten. Im anderen Fall wären sie als typisch zweischichtige Tiere immerhin als Metazoen, vielleicht Gastraeaden, zu bezeichnen. Caullery und Mesnil, die, wie oben dargelegt, auf dem Standpunkt Metschnikoffs stehen, lassen mit einiger Reserve eine hierher gehörige Form, Protospongia Saville Kent als Mesozoon, d. h. als Uebergangsform zwischen Protozoon und Spongien gelten. Das Tier soll aus amöboiden (Ektoderm-)Zellen und Choanocyten (Entodermzellen) bestehen.

Die Urnen der Sipunculiden. Anhangsweise führen Delage und Hérouard im System der Mesozoen diese merkwürdigen Bildungen an, die sich in der Leibeshöhle der Sipunculiden finden und von verschiedenen Forschern als parasitische Ciliaten, als Bestandteile des Wurmorganismus, und von Kunstler und Gruvel als vielzellige parasitische Tiere gedeutet wurden, die nach dem Typus der Gastrula gebaut sein sollen. Neuerdings wurde der Streit durch eine Untersuchung Selenskys (1907) entschieden, der die Entstehung der Gebilde aus Gewebselementen der Gefäßwand der Würmer feststellte. Die „Urnen" oder Töpfchen, die früher in die Gattungen Kunstleria und Pompholyxia eingeteilt wurden, sind also normale Bestandteile des Organismus der Sipunculiden und spielen wahrscheinlich eine Rolle bei der Reinigung der Cölomflüssigkeit von abgestorbenen Elementen.

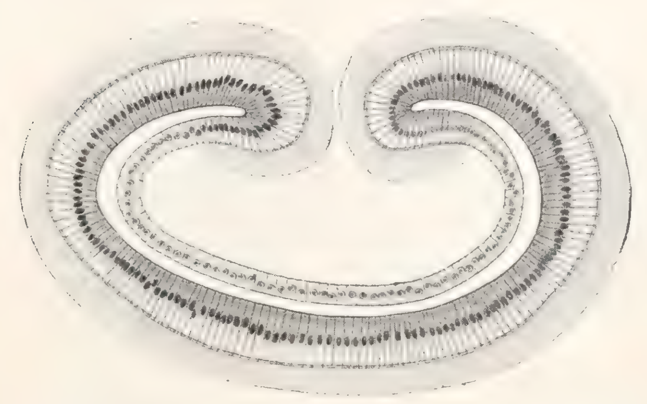


Fig. 11. Schnitt durch Pemmatodiscus socialis. Nach Monticelli aus Delage und Hérouard.

ε) Siedleckia. Aus nicht recht ersichtlichen Gründen wurde von Labbé (1899) dieser Darmparasit mariner Würmer zu den Mesozoen in Beziehung gebracht. Caullery und Mesnil (1900) und V. Dogiel (1910) haben diese Ansicht zurückgewiesen und das Tier, offenbar mit Recht, den Gregarinen zugerechnet. Es ist ein wurmförmiger, einzelliger aber vielkerniger Organismus, der an der Darmwand des Wirtstieres mit einem Befestigungsapparat, wie er bei vielen Gregarinen vorkommt, angeheftet ist. Ueber die Fortpflanzung ist nichts Näheres bekannt.

3. Systematik der Mesozoen. Subregnum des Tierreiches: Mesozoa. Morulaartige Organismen mit nur einer somatischen Zellschicht und primärem Generationswechsel.

I. Klasse Rhombozoa. E. van Beneden. Die ungeschlechtlichen Individuen bestehend aus einer einzigen Axialzelle und einer Schicht meist bewimperter Außenzellen, ohne Segmentierung des Körpers. Die Fortpflanzungszellen entstehen endogen in der Axialzelle. Die männlichen Individuen weisen statt einer Axialzelle einen aus einer geringen Anzahl von Zellen gebildeten Hoden auf. Bei weiblichen Individuen werden auch die Außenzellen zu Eiern.

1. Ordnung Dicyemida E. van Beneden. Rhombozoen mit Kopfkappe. Warzen seitlich und terminal.

a) Gattung Dicyema Kölliker. Kopfkappe aus acht Zellen bestehend.

b) Gattung Dicyemennea Whitman. Kopfkappe aus neun Zellen bestehend.

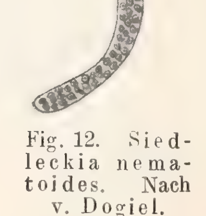


Fig. 12. Siedleckia nematoides. Nach v. Dogiel.

2. Ordnung Heterocyemida E. van Beneden. Rhombozoen ohne Kopfkappe. Warzen nur terminal oder fehlend.

a) Gattung Conocyema E. van Beneden. Außenzellen bei jüngeren Tieren bewimpert. Vier Terminalwarzen.

b) Gattung Microcyema E. van Beneden. Außenzellen nicht bewimpert. Ohne Warzen.

II. Klasse Plasmodiogenea Neresh. Die ungeschlechtlichen Individuen sind Plasmodien, die Fortpflanzungszellen entstehen endogen. Die Geschlechtstiere bestehen aus einer Schicht bewimperter Außenzellen und vielen Geschlechtszellen.

1. Ordnung Orthonectida Giard. Die Außenzellen der Geschlechtstiere in Ringen angeordnet. Plasmodien ohne Hülle.

a) Gattung Rhopalura Giard. Körper der Geschlechtstiere nicht über zehnmal so lang wie breit. Meist gonochoristisch.

b) Gattung Stoecharthrum Caullery und Mesnil. Körper der Geschlechts-

tiere fadenförmig, fünfzigmal so lang wie breit. Hermaphrodit.

2. Ordnung Heteronectida Neresh. Geschlechtstiere nicht segmentiert. Plasmodium kugelig, in fester Hülle.

Gattung Pelmatosphaera Caullery und Mesnil. Mit den Charakteren der Ordnung.

III. Anhang. Nicht näher zu klassifizierende Formen:

a) Gattung Buddenbrockia O. Schröder.

b) Gattung Lohmannella Neresh.

c) Gattung Amoebophrya Köppen.

d) Gattung Salinella Frenzel.

4. Biologie. Sämtliche Mesozoen mit Ausnahme von Salinella, die frei in Salzlösung schwimmend beobachtet wurde, sind Parasiten wirbelloser Tiere. Unter ihnen lebt ausschließlich Buddenbrockia in Süßwassertieren, nämlich Bryozoen, u. z. in der Leibeshöhle. Die Rhombozoen sind alle Parasiten der Cephalopoden, deren Venenanhänge sie bewohnen. Die Plasmodiogenea sind Parasiten verschiedener mariner Tiere, wie Ophiuren, Anneliden, Nemertinen, sie schmarotzen in den verschiedensten Organen, teils in Hohlräumen des Körpers, teils im Gewebe. Amoebophrya lebt in Radiolarien (Sticholonche, Acanthometra) und anderen Protozoen (Noctiluca), Lohmannella in verschiedenen Arten der Appendicularengattung Fritillaria. Alle parasitischen Mesozoen scheinen die Gewebssäfte ihrer Wirte durch die ganze Körperoberfläche aufzunehmen; nur Lohmannella scheint durch die pseudopodienartigen Fortsätze am Kopfstück die Organe des Wirtes auszusaugen. Einige Orthonectiden und Lohmannella rufen die parasitäre Kastration des Wirtes hervor.

Literatur. ***M. Caullery*** *und* ***F. Mesnil,*** *Recherches sur les Orthonectides. Archives d'anatomie microscopique, Bd. 4, 1901.* — ***Delage et Hérouard,*** *Traité de zoologie concrète Bd. 2, Paris, 1899.* — ***M. Hartmann,*** *Die Fortpflanzungsweisen der Organismen, Biolog. Zentralbl., Bd. 24, 1904.* — ***Derselbe,*** *Unters. über d. Generationswechsel der Dicyemiden. Mém. publ. par la classe des sciences de l'Acad. roy. de Belg. Nouv. sér., Bd. 11, 1907.* — ***E. Neresheimer,*** *Die Mesozoen, Zoolog. Zenlralbl., Bd. XV, 1908. Hier ein vollständiges Verzeichnis der einschlägigen Literatur bis 1908.* — ***O. Schröder,*** *Buddenbrockia plumatellae, eine neue Mesozoenart aus Plumatella repens L. u. Pl. fungosa Pall., Zeitschr. f. wissensch. Zoologie, Bd. 96, 1910.* — ***V. Dogiel,*** *Unters. über einige neue Catenata, Zeitschr. f. wiss. Zool., Bd. 94, 1910.*

E. Neresheimer.

Messen

siehe den Artikel „Maß und Messen".

Metalle.

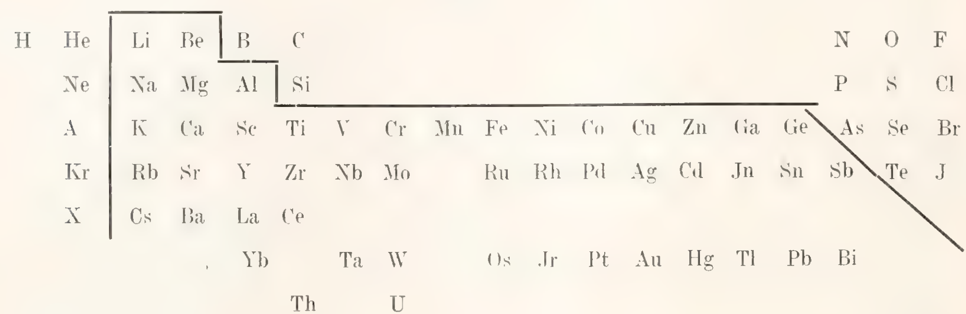
1. Der Begriff „Metall". 2. Einteilung der Metalle. 3. Vorkommen und Gewinnung der Metalle. 4. Die physikalischen Eigenschaften der Metalle: a) Die optischen Eigenschaften. b) Spezifisches Gewicht und Volum. Atomvolum. c) Die mechanischen Eigenschaften. d) Die thermischen Eigenschaften: α) Das Wärmeleitvermögen. β) Die spezifische und die Atomwärme. γ) Schmelzen und Verdampfen der Metalle. δ) Umwandlungen der Metalle. e) Die elektrischen Eigenschaften der Metalle: α) Das elektrische Leitvermögen. β) Die Elektronenstrahlung erhitzter Metalle. γ) Der Zerfall der radioaktiven Metalle. δ) Der elektrolytische Lösungsdruck. ε) Die thermoelektrischen Eigenschaften. 5. Die chemischen Eigenschaften der Metalle. Das Verhalten gegen andere Elemente und Verbindungen: a) Das Verhalten zu den homöopolaren Elementen. Legierungen. b) Das Verhalten zu den heteropolaren Elementen. Salze. c) Das Verhalten zu Verbindungen. Verhalten zu festen Körpern, Flüssigkeiten, Gasen. d) Die katalytischen Wirkungen der Metalle.

1. Der Begriff „Metall". Der populäre Begriff eines Metalls ist der eines schweren, kompakten, sich kalt anfühlenden Körpers von eigentümlichem Glanz (Metallglanz). Dieser Begriff, wie er von den historischen, meist schon im Altertum bekannten, gediegen in der Natur vorkommenden oder leicht erhältlichen Metallen abgeleitet ist, hat durch die Fortschritte der Wissenschaft vielfache Erweiterung und Beschränkung erfahren. Durch die Zerlegung der Alkalien, der alkalischen Erden und der Erden sind zu den historischen „Schwermetallen" die „Leichtmetalle" gekommen. Andererseits müssen auf Grund chemischer Analogien Elemente von metallischem Aussehen ganz oder in vielen Beziehungen den Nichtmetallen zugezählt werden (Sb, Bi, Ge): Eine scharfe Trennungslinie zwischen Metallen und Nichtmetallen existiert nicht (vgl. den Artikel „Nichtmetalle").

Allen Metallen gemeinsam ist der erwähnte eigentümliche Glanz und damit zusammenhängend eine äußerst geringe Lichtdurchlässigkeit, außerdem ein gutes Leitvermögen für Elektrizität und Wärme. Eine Eigenschaft, die sich ganz besonders zu einer scharfen Abgrenzung der Metalle eignet, ist die Wanderungsrichtung der Metallionen in den elektrolytischen Lösungen: Die einfachen (nicht komplexen) Metallionen sind positiv und wandern zur Kathode (vgl. den Artikel „Elektrochemie").

In chemischer Beziehung sind die Metalle dadurch charakterisiert, daß sie untereinander flüssige und „feste“ Lösungen sowie Verbindungen zu bilden vermögen, in denen der Metallcharakter völlig erhalten bleibt (vgl. den Artikel „Legierungen“), während beim Zusammenbringen mit Nichtmetallen unter starker Reaktion ganz andersartige Produkte entstehen (Salze). Das hauptsächlichste chemische Merkmal der Metalle liegt aber darin, daß ihre Oxyde, wenn sie löslich sind, dem Wasser alkalische Reaktion verleihen, jedenfalls aber die Fähigkeit besitzen, Säuren zu neutralisieren, mit ihnen „Salze“ zu bilden.

Tabelle 1.



H	He	Li	Be	B	C											N	O	F
	Ne	Na	Mg	Al	Si											P	S	Cl
	A	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Ni	Co	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br
	Kr	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo		Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	Jn	Sn	Sb	Te	J
	X	Cs	Ba	La	Ce													
			,	Yb		Ta	W		Os	Jr	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi		
					Th		U											

Sehr instruktiv ist endlich die Stellung der Metalle im periodischen System der Elemente. Aus der Tabelle 1 ersieht man, daß sich die Metalle auf der linken Seite des Systems befinden, und daß sie von den Nichtmetallen durch eine schräge Linie abgegrenzt werden: Der metallische Charakter nimmt mit steigendem Atomgewicht zu. Die Grenzelemente (Ge, Sb, Bi) zeigen nur schwach metallischen Charakter, andererseits besitzen die Grenzelemente auf der nichtmetallischen Seite Neigung zur Ausbildung von metallischen Modifikationen (As, Se, Te). Vgl. den Artikel „Chemische Elemente“.

Ueber das eigentliche Wesen des metallischen Zustandes sind die wichtigsten Aufschlüsse von der Elektronentheorie gegeben worden und noch zu erwarten: nach dieser Theorie ist der metallische Zustand der Materie charakterisiert durch einen hohen Gehalt an freien Elektronen (vgl. den Artikel „Elektron“).

Aus dem Gesagten läßt sich eine ungefähre Definition des Begriffs „Metall“ gewinnen, die durch die folgende Beschreibung der physikalischen und chemischen Eigenschaften der Metalle ergänzt und anschaulich gemacht wird:

Metalle sind chemische Grundstoffe, die gekennzeichnet sind **äußerlich** durch ein kompaktes Aussehen und einen eigentümlichen Glanz, **in physikalischer Beziehung** durch ein gutes Leitvermögen für Elektrizität und Wärme und durch die Fähigkeit positive Ionen zu bilden, **in chemischer Beziehung** durch die Bildung von „Legierungen“ und durch die Basicität ihrer Oxyde, **in systematischer Beziehung** durch ihre Stellung auf der linken Seite des periodischen Systems — und deren **eigentliches Wesen** schließlich nach der Elektronentheorie in einem hohen Gehalt an freien Elektronen begründet ist.

2. Einteilung der Metalle. Die Metalle werden nach den verschiedensten Prinzipien eingeteilt. Schon erwähnt wurde die Einteilung in Leicht- und Schwermetalle. Eine weitere bekannte Einteilung ist die auf Grund der Verwandtschaft zum Sauerstoff oder der elektrolytischen Lösungstension in edle (Ag, Au u. a.) und unedle (Zn, Fe u. a.), in negative und positive. Auf chemischen Analogien beruht die Einteilung in Alkali-, Erdalkali- und Erdmetalle (Metalle der seltenen Erden). Eine weitere Einteilung beruht auf dem Verhalten der Metalle zu den Gruppenreagentien der analytischen Chemie: Metalle der Schwefelwasserstoffgruppe, der Schwefelammoniumgruppe usw.

Die vollkommenste Einteilung der Metalle ist die nach dem periodischen System der Elemente, in dem die Eigenschaften als Funktionen der Atomgewichte erscheinen. Bei der Behandlung der Eigenschaften werden sich überall Beziehungen zum periodischen System ergeben (vgl. den Artikel „Chemische Elemente“).

3. Vorkommen und Gewinnung der Metalle. Die Metalle kommen zum Teil gediegen in der Natur vor (Au, Ag, die

Platinmetalle, Cu, Hg, As, Sb, Bi), in der Hauptsache aber sind es die Oxyde, Sulfide und Carbonate (auch Arsenide) der Metalle, die dem Hüttenmann zur Verarbeitung vorliegen. Verbreitete Mineralien sind auch die Sulfate von Blei, Baryum, Strontium, Calcium. Halogenverbindungen sind selten. Die zahlreichen Silikate kommen für die Verarbeitung wenig in Betracht.

Die Gewinnung der Metalle aus den Erzen ist verschieden je nach der Form, in der sie in denselben enthalten sind. Wenn man von den gediegenen Metallen absieht, so handelt es sich im wesentlichen um Oxyde, Sulfide und Carbonate. Sulfide und Carbonate werden durch Rösten und Glühen in Oxyde übergeführt, so daß der Schlußprozeß der metallurgischen Arbeit meistens die Gewinnung der Metalle aus den Oxyden ist. Diese wird durch Reduktion mit Kohle in geeigneten Oefen (Hochöfen bei Eisen und Kupfer, Retorten beim Zink) ausgeführt. Die frei gemachten Metalle sind entweder flüchtig wie Zink und Quecksilber und werden in Vorlagen aufgefangen, oder sie werden am Boden der Oefen abgestochen.

Die Reduktion vieler Oxyde durch Kohle ist bei den Temperaturen der gewöhnlichen metallurgischen Oefen nicht möglich (Oxyde der Erdalkalimetalle, Magnesium-Aluminiumoxyd, die Oxyde der Chromgruppe). Im elektrischen Ofen werden auch diese leicht reduziert, doch tritt dann Carbidbildung auf. Man gewinnt deshalb diese Metalle bequemer durch andere Verfahren, schmelzflüssige Elektrolyse oder Aluminothermie.

Die schmelzflüssige Elektrolyse (Bäder von geschmolzenen Chloriden und anderen geeigneten Verbindungen) ist von großer Bedeutung für die Darstellung der Metalle geworden. Aluminium wird in großem Maßstab nach dieser Methode durch Elektrolyse einer Lösung von Aluminiumoxyd in Kryolith ($AlFl_3.3NaFl$) gewonnen. Die wässerige Elektrolyse hat mehr Bedeutung für die Raffination der Metalle (Cu, Pb). Zur Gewinnung direkt aus den Erzen durch abwechselnde Laugung und Elektrolyse sind viele Verfahren versucht worden, aber meist ohne Erfolg.

Bei der Aluminothermie nach Goldschmidt wird als Reduktionsmittel feingepulvertes metallisches Aluminium verwendet. Wenn die Reaktion eingeleitet ist, schreitet sie infolge der hohen Verbrennungswärme des Aluminiums, die bei der Nichtflüchtigkeit des Oxydationsprodukts auf einen kleinen Raum konzentriert bleibt, von selbst fort. Auf diese Weise gewinnt man leicht die Metalle Eisen, Chrom und Mangan aus ihren Oxyden (Schienenschweißverfahren von Goldschmidt).

Außer Kohle und Aluminium muß auch noch Natrium als Reduktionsmittel erwähnt werden. Man stellte früher damit Magnesium und Aluminium aus den Chloriden und Fluoriden her.

4. Die physikalischen Eigenschaften der Metalle. 4a) Die optischen Eigenschaften (vgl. den Artikel „Lichtreflexion"). Als besonders charakteristische Eigenschaft der Metalle wurde schon der eigentümliche Glanz erwähnt. Auch manche andere Stoffe zeigen Metallglanz, so gewisse organische Farbstoffe, Indigo, Fuchsin, Methylviolett. Endlich tritt Metallglanz an sonst glanzlosen Substanzen auf, wenn man unter bestimmten Winkeln beobachtet: Glanz von Wasserflächen, Luftblasen unter Wasser, total reflektierende Prismen. Immer beruht der Glanz auf starker Reflexion des Lichts. Für die Metalle geht dies aus der nachstehenden Tabelle von Hagen und Rubens hervor.

Tabelle 2.

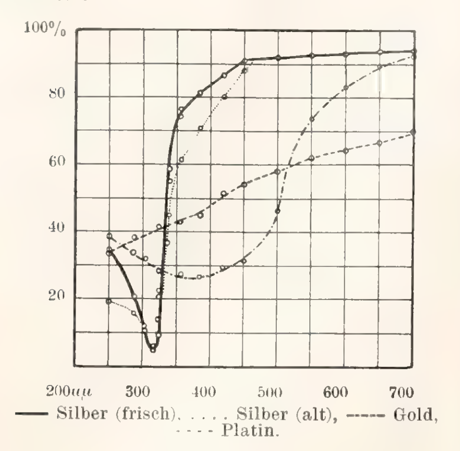
Metall	Wellenlängen in $\mu\mu$						
	450	500	550	600	650	700	
Silber .	90,6	91,8	92,5	93,0	93,6	94,6	% senk-
Platin .	55,8	58,4	61,1	64,2	66,3	70,1	recht
Nickel .	58,5	60,8	62,6	64,9	65,9	69,8	reflek-
Stahl .	57,5	57,4	57,3	58,0	58,4	60,0	tiertes
Gold .	36,8	47,3	74,7	85,6	88,2	92,3	Licht
Kupfer	48,8	55,3	59,5	83,5	89,0	90,7	

Die Tabelle erklärt sofort den hellen Glanz des Silbers, den matten Glanz des Stahls, sie gibt auch Auskunft über die Entstehung der Farbe bei den wenigen gefärbten Metallen (die meisten sind weiß oder grau). Die Farbe beruht auf selektiver Absorption: Gold reflektiert wenig im blauen Teil des Spektrums, stark im gelben und roten, bei Kupfer ist die Reflexion noch mehr nach dem roten Ende verschoben.

Entsprechend der starken Reflexion sind die Metalle am wenigsten durchsichtig von allen Stoffen, schon Schichten von $^1/_{100000}$ mm lassen kein Licht durch, bei selektiver Reflexion ist das durchgelassene komplementär gefärbt, Goldhäutchen sind im durchscheinenden Licht blau.

Von besonderem Interesse ist der Verlauf der Reflexionskurven im Ultraviolett und im Ultrarot. Im Ultraviolett zeigen die einzelnen Metalle noch mehr als im sichtbaren Spektrum einen völlig regellosen, individuellen Verlauf, die Kurven schneiden sich, die Reihenfolge der Metalle ändert sich fortwährend. Silber erreicht bei ca. 300 $\mu\mu$ ein Minimum von etwa 5% und kommt damit weit unter das Platin zu stehen, während es im sichtbaren Spektrum am besten von allen Metallen reflektiert. Im Ultrarot dagegen ist der Gang aller Kurven analog, sie steigen regelmäßig an und ordnen sich in eine Reihe, — die zugleich die Reihenfolge darstellt, nach welcher

die Metalle den elektrischen Strom leiten: Das besser reflektierende Metall ist auch der bessere Leiter der Elektrizität.



— Silber (frisch), ... Silber (alt), ----- Gold, - - - - Platin.

Dieser Parallelismus der elektrischen Leitfähigkeit mit den optischen Eigenschaften ist ein Postulat der Maxwellschen elektromagnetischen Lichttheorie. Aus dieser ergibt sich die Formel: $(100-R)\sqrt{\sigma} =$ konst. Das Produkt der Absorption $(100-R)$[1]) mit der Wurzel aus der Leitfähigkeit soll konstant sein. Die Tabelle 3 zeigt, in welchem Grade dies für lange Wellen („Reststrahlen" von Flußspat 25,5 $\mu\mu$) zutrifft.

Tabelle 3.

	$\sqrt{\sigma}$	100—R	$(100-R)\sqrt{\sigma}$
Silber . . .	6,26	1,13	— 7,07
Kupfer . .	5,70	11,7	— 6,67
Gold . . .	5,21	1,56	— 8,10
Aluminium.	4,52	1,97	— 8,91
Zink. . . .	3,19	2,27	— 7,24
Cadmium .	2,86	2,55	— 7,29

Die Uebereinstimmung ist mit Ausnahme von Wismut sehr gut. Die Reflexion wurde durch Bestimmung der Emission gemessen (vgl. den Artikel „Strahlungsmessung"), die mit der Absorption und damit mit der Reflexion nach dem Kirchhoffschen Gesetz zusammenhängt: Man ist demnach imstande, durch Strahlungsmessungen im Ultrarot elektrische Widerstandsbestimmungen auszuühren.

Der Grund, warum die Maxwellsche Theorie nur bei langen Wellen mit der Wirklichkeit übereinstimmt, ist nach der Elektronentheorie in folgendem zu sehen: Nach dieser Theorie hat man sich als die Träger und Vermittler der optischen und elektrischen Erscheinungen die Elektronen vorzustellen, die „Elementarquanten" der Elektrizität. Diese Elektronen sind von verschiedener Art: an Gleichgewichtslagen gebundene „Schwingungselektronen" und frei bewegliche „Leitungselektronen". Die letzteren sind immer negativ. Für die Elektrizitätsleitung kommen nun nur die Leitungselektronen in Betracht, für die optischen Erscheinungen auch die Schwingungselektronen, wenn ihre Eigenschwingungen mit der Periode der eindringenden Wellen übereinstimmen. Aus der Vernachlässigung der in diesem Fall auftretenden Resonanzerscheinungen sind die Abweichungen der Maxwellschen Theorie von der Wirklichkeit im Gebiet der kürzeren Wellen zu erklären.

Interessante Verhältnisse ergab auch die Bestimmung der Brechungsindizes bei den Metallen (vgl. den Artikel „Lichtbrechung"). Kundt maß an Prismen von 11″ bis 51″, die er durch elektrolytischen Niederschlag von Metallen zwischen Glasplatten und -röhren erhielt, Refraktion und Dispersion (Tab. 4).

Tabelle 4.

	Rot	Gelb	Blau
Silber . . .	—	0,27	—
Gold . . .	0,38	0,58	1,00
Kupfer . .	0,45	0,56	0,95
Platin . . .	1,76 >	1,64	1,44
Eisen . . .	1,81 >	1,73	1,52
Nickel . . .	2,17 >	2,01	1,85
Wismut . .	2,61 >	2,26	2,13

Nach einer ganz anderen Methode (Elliptizität des reflektierten Lichts) bestimmte Drude folgende Indizes für rotes bezw. gelbes Licht (Tab. 5).

	n
Gold	0,366
Silber	0,181
Kupfer	0,641
Natrium	0,005
Platin	2,06
Stahl	2,41
Quecksilber	1,73

Aus den Tabellen ist zweierlei zu entnehmen. Erstens: daß die Metalle Platin, Eisen, Nickel und Wismut sogenannte „anomale" Dispersion besitzen, d. h. daß sie die Farbenordnung des normalen Spektrums umkehren, längere Wellen stärker brechen als kürzere, und zweitens: daß sich, entsprechend der Definition des Brechungsindex als des Verhältnisses der Lichtgeschwindigkeit in zwei Medien, das Licht in den Metallen Silber, Gold, Kupfer und Natrium schneller fortpflanzt als im freien Aether.

[1]) R = % reflektierte Strahlung.

Eine weitere optische Eigentümlichkeit der Metalle ist die Erscheinung, daß bei ihnen das Licht (auch linear polarisiertes) unter allen Einfallswinkeln elliptisch polarisiert wird: sie besitzen keinen „Brewsterschen Winkel", bei dem völlig lineare Polarisation eintritt, wie dies bei anderen Substanzen der Fall ist (vgl. den Artikel „Lichtpolarisation").

Die Dämpfe der Metalle geben charakteristische Linienspektren, wodurch ihr spektralanalytischer Nachweis ermöglicht wird. Schickt man Licht durch absorbierende glühende Metalldämpfe, so zeigt sich in der Umgebung der Absorptionslinien anomale Dispersion: besonders schön ist dies bei den D-Linien des Natriumdampfes zu beobachten (vgl. die Artikel „Spektroskopie" und „Spektralanalyse").

4b) Spezifisches Gewicht und Volum. Atomvolum (vgl. dazu die Artikel „Atomlehre" und „Dichte"). Die spezifischen Gewichte der Metalle zeigen die verschiedensten Werte — von 0,59 bis 22,5 — wie es im einzelnen aus Tabelle 6 hervorgeht:

Tabelle 6.

Lithium	0,59
Kalium	0,86
Natrium	0,97
Rubidium	1,52
Calcium	1,57
Magnesium	1,74
Aluminium	2,60
Baryum	3,75
Germanium	5,47
Arsen	5,73
Antimon	6,7
Zink	7,1
Zinn	7,3
Eisen	7,8
Kobalt	8,5
Kupfer	8,9
Wismut	9,8
Silber	10,5
Blei	11,4
Palladium	11,5
Thallium	11,8
Quecksilber	13,55 (fest 14,2)
Gold	19,3
Platin	21,5
Iridium	22,4
Osmium	22,5

Die Metalle mit einem spezifischen Gewicht kleiner als 5 werden als Leichtmetalle, die anderen als Schwermetalle bezeichnet. Das spezifische Gewicht nimmt im allgemeinen mit dem Atomgewicht zu, doch wird dieser allgemeine Gang von einer deutlichen periodischen Abhängigkeit vom Atomgewicht überlagert: In der Mitte der Horizontalreihen des periodischen Systems befinden sich Maxima.

Noch deutlicher wird diese Beziehung, wenn man den reziproken Wert der Dichte nimmt, das spezifische Volum, und dieses mit dem Atomgewicht multipliziert, d. h. wenn man die relativen Volumina der Atome, die Atomvolumina betrachtet.

Aus der Atomvolumkurve von V. Meyer (Fig. 2) ergibt sich für die Metalle, daß die Alkalimetalle das größte, die Metalle der Gruppe VIII (Eisen- und Platinmetalle) das kleinste Atomvolum besitzen. Der Einfluß des Atomvolums auf die Eigenschaften der Elemente ist ein sehr bedeutender, es wird im folgenden immer wieder darauf zurückzukommen sein. Diese Beziehungen sind besonders von Traube untersucht worden.

4c) Die mechanischen Eigenschaften der Metalle (vgl. die Artikel „Elastizität" und „Festigkeit"). In ihren mechanischen Eigenschaften zeigen die Metalle alle Abstufungen: Kalium und Natrium sind weich wie Wachs, Chrom ist so hart, daß es Glas ritzt — die meisten Metalle sind sehr dehnbar (Stanniol, Blattgold), Antimon und Wismut sind so spröde, daß sie gepulvert werden können —, Zink ist in der Kälte spröde, zwischen 120° und 150° kann es zu Platten ausgewalzt werden und ist dann auch bei gewöhnlicher Temperatur biegsam, bei 200 bis 300° wird es wieder spröde. Für die meisten mechanischen Eigenschaften (Dehnbarkeit, Härte, Zugfestigkeit, Elastizitätsmodul usw.) scheint eine deutliche Abhängigkeit vom Atomvolum, also eine periodische Abhängigkeit vom Atomgewicht zu bestehen. Für die Härte hat Rydberg eine Tabelle aufgestellt, aus der in Tab. 7 die Zahlen für die 1. große Periode gegeben werden:

Tabelle 7.

K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge
0,5	1,5	(3,0)	(4,0)	(6,0)	9,0	(6,0)	4,5	(5,0)	(5,0)	3,0	2,5	1,5	(3,0)

Die mechanischen Eigenschaften sind in hohem Maße von der Vorbehandlung und der Struktur abhängig (siehe auch den Artikel „Mechanochemie").

4d) Die thermischen Eigenschaften der Metalle. *α*) Das Wärmeleitvermögen. (vgl. den Artikel „Wärmeleitung"). Die Metalle fühlen sich kalt an, d. h. sie vermögen die Körperwärme rasch abzuleiten und an die kältere Umgebung abzugeben: die Metalle sind gute Wärmeleiter. Die Tabelle 8 zeigt das Verhältnis der Leitfähigkeit, wenn man die des Silbers = 100 setzt.

Tabelle 8.

Silber	100,0
Kupfer	73,6
Gold	53,2
Zink	19,0
Zinn	14,5
Eisen	11,9
Blei	8,5
Platin	8,4
Palladium	6,3
Wismut	1,8

Auch diese Reihenfolge ist, wie die bezüglich der optischen Eigenschaften, in Uebereinstimmung mit der Reihe, in die sich die Metalle auf Grund ihres elektrischen Leitvermögens ordnen, ja die Uebereinstimmung ist eine quantitative, wie bei der Behandlung des elektrischen Leitvermögens ausgeführt werden wird.

β) Die spezifische und die Atomwärme (vgl. die Artikel „Atomlehre" und „Kalorimetrie"). Ebenso verschieden wie die Leitfähigkeit für Wärme ist die Aufnahmefähigkeit der Metalle für Wärme, ihre spezifische Wärme. Wie bei vielen anderen Eigenschaften ergeben sich auch hier einfache Verhältnisse, wenn man nicht gleiche, sondern stöchiometrisch vergleichbare Mengen betrachtet. So fanden Dulong und Petit das nach ihnen benannte Gesetz

Atomgewicht $\times$ spez. Wärme = konst. = ca. 6,4.

Diese Beziehung, die ungefähre Konstanz der „Atomwärme", hat, wie bekannt, eine große Bedeutung für die Ableitung von Atomgewichten aus den Aequivalentgewichten: das Aequivalentgewicht muß multipliziert mit der Wertigkeit und der spezifischen Wärme ungefähr 6,4 ergeben.

Nach der Analyse von $CaCl_2$ ist darin das Verhältnis von Calcium zu Chlor 20:35,5. Die spezifische Wärme des Calciums ist 0,170. Der Formel CaCl entspräche: $1 \times 20 \times 0.170 = 3,4$, der doppelte Wert 6,8 weicht wenig von der Dulong-Petitschen Konstanten ab, also hat man die Formel $CaCl_2$ und als Atomgewicht des Calciums 40 zu wählen.

Es ist eigentümlich, daß diese wertvolle Beziehung nur bei den gewöhnlichen Temperaturen Gültigkeit besitzt und bei sehr hohen und tiefen Temperaturen jede Bedeutung verliert. Für einige Elemente (Be, B, C, Si) war die spezifische Wärme schon lange als eine starke Temperaturfunktion bekannt. Die Atomwärme dieser Elemente ist bei gewöhnlicher Temperatur abnorm klein, nähert sich aber mit steigender Temperatur dem Wert 6,4. Aber erst durch die neuesten Forschungen (Einstein, Nernst, Lindemann) ist es gelungen, die spezifische und Atomwärme ganz allgemein als Temperaturfunktion nachzuweisen und auf Grund von theoretischen Ueberlegungen den Gang derselben durch Formeln darzustellen, welche die Atomwärme in Beziehung setzen zur (absoluten) Temperatur, der Konstanten R der kinetischen Gastheorie, der Konstanten β der Planckschen Strahlungstheorie und einer Atomkonstanten ν, der Schwingungszahl des „Atomresonators".

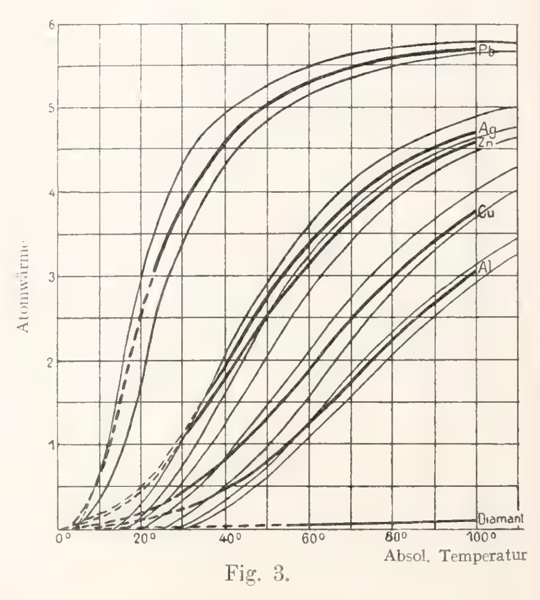


Fig. 3.

Die Figur 3 zeigt in den dick ausgezogenen Linien den Verlauf der Atomwärme für die Metalle Blei, Silber, Zink, Kupfer, Aluminium, wie sie im Nernstschen Laboratorium bei den Temperaturen der flüssigen Luft und des flüssigen Wasserstoffs gemessen wurden. Die dünn ausgezogenen Kurven geben den Gang, wie er sich nach der Einsteinschen Formel berechnen läßt. Diese lautet:

$$\frac{dW}{dT} = 3R \cdot \frac{e^{\frac{\beta\nu}{T}} \left(\frac{\beta\nu}{T}\right)^2}{\left(e^{\frac{\beta\nu}{T}} - 1\right)^2} \quad \ldots \ldots 1)$$

Von Lindemann wurde außerdem eine Formel aufgestellt, welche die Schwingungszahl ν aus dem Schmelzpunkt T_s (absolute Temperatur), dem Atomgewicht m, und dem Atomvolum V ableitet:

$$\nu = 2,12 \times 10^{12} \sqrt{\frac{T_s}{mV^{2/3}}} \quad \ldots \ldots 2)$$

Die Tabelle 9 gibt die Lindemannschen ν-Werte und die auf Grund der Beobachtung nach Formel 1) berechneten Werte

Tabelle 9.

	nach Formel 1	nach Formel 2
Blei	$1{,}44 \cdot 10^{12}$	$1{,}4 \cdot 10^{12}$
Silber	$3{,}3 \cdot 10^{12}$	$3{,}3 \cdot 10^{12}$
Zink	$3{,}6 \cdot 10^{12}$	$3{,}3 \cdot 10^{12}$
Kupfer	$4{,}93 \cdot 10^{12}$	$5{,}1 \cdot 10^{12}$
Aluminium . . .	$5{,}96 \cdot 10^{12}$	$5{,}8 \cdot 10^{12}$

Die Schwingungszahlen ν sind, wie dies von Biltz gezeigt wurde, periodische Funktionen des Atomgewichts, sie sind ganz besonders dazu geeignet, einen Einblick in den Zusammenhang der Elemente zu gewähren, indem sie nicht, wie Atomvolume und Schmelzpunkte, Massenkonstanten, sondern wie die Spektrallinien Atomkonstanten sind. Ein weiterer Vorzug der Biltzschen Anordnung, der die Lindemannsche Formel zugrunde liegt, ist, daß durch dieselbe zwei Eigenschaften, Schmelzpunkt und Dichte, in Beziehung zum Atomgewicht gesetzt sind. Es ergibt sich eine sehr übersichtliche und natürliche Ordnung der Elemente.

γ) Schmelzen und Verdampfen der Metalle (vgl. den Artikel „Thermometrie"). Die Schmelzpunkte der Metalle liegen sehr verschieden: Quecksilber ist bei gewöhnlicher Temperatur flüssig und erstarrt erst bei —38,5°, sehr leicht schmelzbar sind die Alkalimetalle (unter 100°), bei mäßigen Temperaturen (300 bis 400°) die Metalle Blei, Cadmium, Zinn, Zink u. a., die meisten Metalle haben einen sehr hohen Schmelzpunkt, die Extreme sind Iridium, aus dem elektrische Oefen für hohe Temperaturen gebaut werden und die Metalle der Metallfadenglühlampen, Tantal, Osmium, Wolfram. Die Schmelztemperatur des Wolframs liegt über 2800° (v. Wartenberg). Die Tabellen 10 und 11 geben die Schmelzpunkte der einzelnen Metalle, in Tabelle 11 in der Anordnung des periodischen Systems.

Tabelle 10.

Metall	Schmelzpunkt in °C	Metall	Schmelzpunkt in °C
Aluminium .	687	Molybdän .	2100
Antimon . .	631	Natrium .	98
Baryum . . .	850	Neodym .	840
Blei	327	Nickel . .	1451
Cadmium . .	322	Osmium .	2500
Cäsium . . .	27	Palladium.	1541
Calcium . . .	780	Platin . .	1745
Cer	632	Praseodym	940
Chrom . . .	1515	Quecksilber	— 38,5
Eisen (rein) .	1512	Rhodium .	1907
Gallium . . .	30	Rubidium.	39
Germanium .	c. 900	Ruthenium	> 1950
Gold	1064	Silber . .	961,5
Indium . . .	155	Strontium.	c. 600
Iridium . . .	2292	Tantal . .	< 2200
Kalium . . .	63	Thallium .	304
Kobalt . . .	1472	Uran . . .	—
Kupfer . . .	1084	Vanadium.	1680
Lanthan . . .	810	Wismut. .	268
Lithium . . .	186	Wolfram .	2800-2850
Magnesium .	651	Zink . . .	419
Mangan . . .	1245	Zinn . . .	332

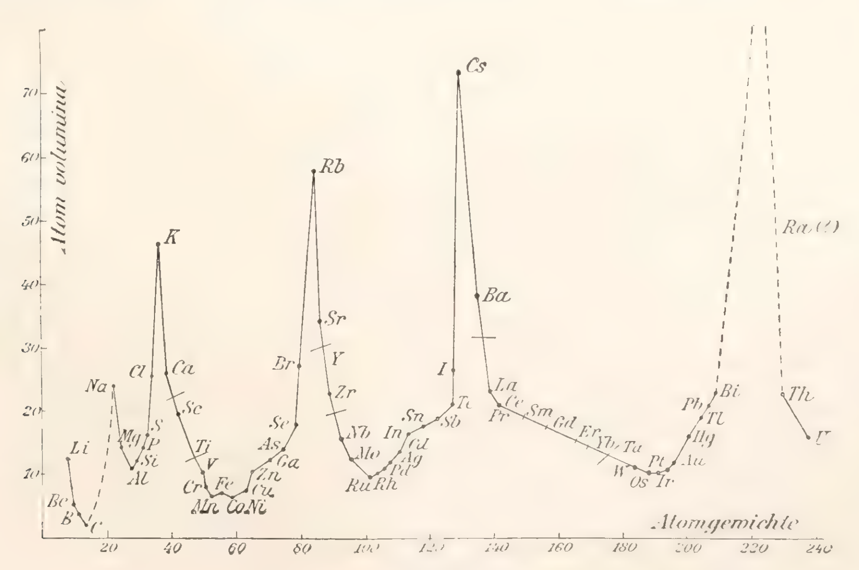


Fig. 2.

Tabelle 11.

Schmelzpunkte der Elemente in absoluter Zählung (von —273° an).
n. g. bedeutet: nicht geschmolzen; s. h. sehr hoch; s. n. sehr niedrig; üb. über; u. unter; h. a. höher als; n. a. niedriger als; ferner beim Phosphor r. rot; f. farblos.

0	I	II	III		IV	V	VI	VII	VIII		
	H 14										
He n. a. 6	Li 459	Be n. a. Ag	B n. g.		C n. g.	N 62,5	O 28	F 50			
Ne s. n.	Na 371	Mg 924	Al 930		Si 1703	P r. 903 f. 317	S 388	Cl 171			
A 85	K 336	Ca 1043	Sc ?		Ti üb. 2570	V 1953	Cr 1788	Mn 1520	Fe 1818	Co 1778	Ni 1757
	Cu 1357	Zn 692		Ga 303	Ge 1200?	As bei Rotglut	Se 490	Br 266			
Kr 104	Rb 312	Sr h. a. Ca.	Y ?		Zr h. a. Si	Nb 2223	Mo 2373	—	Ru h. a. 2220	Rh h. a. Pt	Pd 1850
	Ag 1234	Cd 595		In 428	Sn 505	Sb 904	Te 723	J 386			
Xe 133	Cs 300	Ba 1123	La 1083	Ce 896	—	—	—	—	—	—	—
	—	—	—		—	Ta 2573	W 2800—2850	—	Os 2770	Jr 2470	Pd 2018
	Au 1337	Hg 234		Tl 575	Pb 600	Bi 541	—	—			
	—	—	—		Th	—	U	—			

Aus der Tabelle 11 geht hervor, daß die Schmelzpunkte periodische Funktionen des Atomgewichts sind. Ein Vergleich mit der Atomvolumkurve ergibt, daß die leicht schmelzbaren Metalle auf den aufsteigenden Aesten und den Maximalpunkten der Kurve, die schwer schmelzbaren auf den absteigenden Aesten und den Minimalpunkten sich befinden.

Die hohen Temperaturen zum Schmelzen der schwerschmelzbaren Metalle werden im elektrischen Ofen erzeugt, eine Anordnung zum Schmelzen im Vakuum wurde von v. Wartenberg bei seiner Bestimmung des Wolframschmelzpunkts angewendet. Er benützte eine Vakuumröhre mit einer „Wehneltkathode“ d. h. einem mit Erdalkalioxyden bestrichenen Platinblech. Durch die Elektronenstrahlung der Oxyde wird die sonst enorme Kathodenspannung so vermindert, daß man starke Ströme durch die Vakuumröhre schicken kann. Die Substanz befindet sich an der Anode. Durch Konzentration des Stroms auf beliebig kleine Flächen können die höchsten Temperaturen erreicht und lokalisiert werden.

Die geschmolzenen Metalle lösen sich gegenseitig vollständig oder teilweise. Die Erscheinungen beim Erstarren und Schmelzen dieser Lösungen (Eutektika, leicht schmelzende Legierungen usw.) werden in dem Artikel „Legierungen“ behandelt.

Beim Schmelzen dehnen sich die Metalle meist aus, es findet aber auch das Gegenteil statt (Wismut).

Eine Uebersicht über die Schmelzwärmen gibt Tabelle 12 (vgl. die Artikel „Latente Wärme“ und „Kalorimetrie“).

Tabelle 12.

Metall	Temp. der Schmelze in ° C.	Schmelzwärme für 1 kg	Schmelzwärme für 1 g-Atom
Blei	326,2	5,37 Kal.	1,1
Cadmium	320,7	13,7 ,,	1,5
Eisen	1000—1050	6,0 ,,	0,3
Gallium	13	19,1 ,,	1,3
Kalium	58	15,7 ,,	0,6
Kupfer	—	43,0 ,,	2,7
Natrium	96,5	31,7 ,,	0,7
Nickel	—	4,64 ,,	0,3
Palladium	1500	36,3 ,,	3,8
Platin	1779	27,2 ,,	5,3
Quecksilber	—	2,82 ,,	0,6
Silber	999	21,1 ,,	2,3
Wismut	266,8	12,6 ,,	2,6
Zink	415,3	28 ,,	1,8
Zinn	232,7	14,25 ,,	1,7

Ebenso große Unterschiede wie bezüglich

der Schmelzbarkeit der Metalle bestehen auch bezüglich ihrer Flüchtigkeit. Das Quecksilber eröffnet auch hier die Reihe, seine Flüchtigkeit schon bei gewöhnlicher Temperatur läßt sich leicht konstatieren. Einige andere Metalle, Kalium, Natrium, Zink, Cadmium, sind bei nicht allzu hohen Temperaturen flüchtig, Zink und Cadmium werden ja in den hüttenmännischen Betrieben durch Destillation gewonnen. Die meisten Metalle allerdings sind unter gewöhnlichem Druck sehr schwer zu verdampfen, Silber kann mit der Knallgasflamme destilliert werden, andere schwer flüchtige Metalle erfordern die Temperatur des elektrischen Ofens. Im elektrischen Ofen konnte Moissan alle Metalle vergasen.

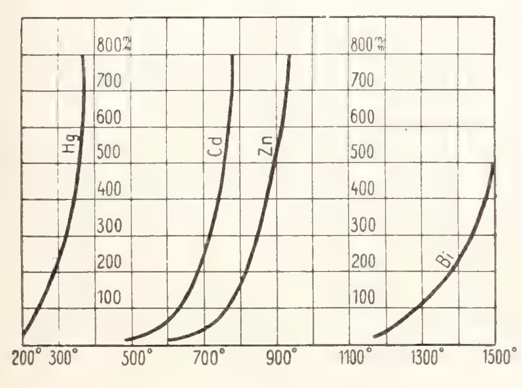


Fig. 4.

Die Dampfdruckkurven der Metalle (Fig. 4) stimmen im wesentlichen mit denen anderer Stoffe überein. In einer anderen Beziehung aber unterscheiden sich die Metalldämpfe von denen der meisten anderen Elemente. Aus den Dichtebestimmungen und ebenso aus dem Verhältnis der spezifischen Wärmen bei konstantem Druck und bei konstantem Volum geht hervor, daß die Dämpfe der Metalle einatomig sind. Diese Eigenschaft haben sie nur mit den Edelgasen gemeinsam. Ueber die Einatomigkeit in den metallischen Lösungen vgl. den Artikel „Legierungen".

Die Tabelle 13 gibt die Siedepunkte der einzelnen Metalle.

Tabelle 13.

Metall	Siedepunkt in ° C.
Aluminium	ca. > 22000
Antimon	1500—1700; 735 im Vakuum des Kathodenlichts
Baryum	siedet im Vakuum
Blei	1580; 1140—1173 i. V. d. Kath.-Lichts
Cadmium	778
Calcium	in Weißglut nicht flüchtig
Chrom	desgl.
Eisen	—
Germanium	flüchtig vor dem Lötrohr
Gold	ca. < 2200; flüchtig i. Vak. d. Kath.-Lichts
Indium	Rotglut
Iridium	nicht flüchtig bis 2200
Kalium	667
Kobalt	—
Kupfer	ca. < 2200
Magnesium	2200
Mangan	—
Natrium	742
Nickel	—
Osmium	bei Weißglut
Palladium	—
Platin	—
Quecksilber	357,25 bei 760 mm
Rubidium	leicht destillierbar
Silber	2050—2100
Tantal	nicht flüchtig bei 2200
Thallium	1280
Wismut	1435
Wolfram	nicht flüchtig bei 2200
Zink	918; 545—560 i. Vak. d. Kath.-Lichts
Zinn	< 2200

In neuerer Zeit sind von Greenwood ungefähre Werte für die Siedepunkte der schwerflüchtigen Metalle bestimmt worden, die zum Teil erheblich von den oben angegebenen differieren (Tab. 14).

Tabelle 14.

Aluminium . . .	1800°	Magnesium . .	1120°
Antimon	1440°	Mangan	1900°
Blei	1525°	Silber	1955°
Chrom	2200°	Wismut	1420°
Eisen	2450°	Zinn	2270°
Kupfer	2310°		

Wesentlich leichter als unter gewöhnlichem Druck gelingt die Verdampfung der Metalle im Vakuum. Diese Untersuchungen sind hauptsächlich von Krafft und Knocke und von Kahlbaum ausgeführt worden. Krafft fand die folgenden Temperaturen für den Beginn der Verdampfung im Vakuum (Tab. 15).

Tabelle 15.

Calcium	398°
Strontium	373°
Baryum	355°
Magnesium	415°
Platin	540°
Iridium	660°
Palladium	735°
Osmium	< 800°
Eisen	< 755°
Kobalt	< 640°
Nickel	750° (vorläufig)

Außerdem ergab sich eine interessante Regelmäßigkeit, die aus der folgenden Tabelle (16) ersichtlich ist.

Die Differenzen von der beginnenden Verdampfung im Vakuum bis zum Siedepunkt im Vakuum und von dort bis zum Siedepunkt unter Atmosphärendruck sind nahezu gleich.

Tabelle 16.

	Temp. des beginnenden Verdampfens im Vakuum	Diff.	Siedepunkt im Vakuum	Diff.	Siedepunkt bei 760 mm
Zink	184°	336	550°	370	920°
Cadmium	156°	294	450°	299	749°
Wismut	270°	723	993°	707	1700°
Silber	680^3	680	1360°	680	2040°
Natrium	98°	320	418°	324	742°
Kalium	63°	302	365°	302	667°
Quecksilber	— 40°	105	155°	202	357°

Diese Regel wurde von Moissan benützt, um die ungefähren Siedepunkte von Kupfer und Gold unter Atmosphärendruck zu bestimmen (Tab. 17).

Tabelle 17.

Kupfer	960°—640—1600°—640—(2240°)
Gold	1070°—730—1800°—730—(2530°)

Für die Siedepunkte scheinen dieselben Beziehungen zum Atomvolum zu bestehen wie für die Schmelzpunkte.

δ) Umwandlungen der Metalle (vgl. die Artikel „Isomerie“ und „Chemische Elemente“). Verschiedene Metalle zeigen die verbreitete Erscheinung der Polymorphie, sie kommen in mehreren Modifikationen vor, die zum Teil in derselben Weise von der Temperatur abhängig sind wie die Aggregatzustände: oberhalb einer bestimmten Temperatur ist die eine Modifikation stabil, unterhalb dieser Temperatur die andere. Diese Temperatur wird als Umwandlungspunkt bezeichnet und ist den anderen Kardinalpunkten, dem Schmelz- und dem Siedepunkt, in jeder Weise gleich zu stellen.

Besonders gut studiert ist die Umwandlung des weißen Zinns in die graue Modifikation unterhalb 21° (Zinnpest), und die Umwandlungen des gewöhnlichen magnetischen α-Eisens in die unmagnetische β- und γ-Modifikation bei höheren Temperaturen.

Außer diesen „enantiotropen“ Modifikationen existieren noch andere, welche in ihren gegenseitigen Beziehungen keine Temperaturabhängigkeit zeigen, bei allen Temperaturen ist die eine Modifikation labil (gewöhnliches und explosives Antimon). Diese Modifikationen werden als „monotrop“ bezeichnet.

Eine weitere Einwirkung der Temperatur ist die auf die Struktur der Metalle. Ganz allgemein haben große Kristalle die Tendenz, auf Kosten der kleineren zu wachsen, diese Umwandlung wird durch erhöhte Temperatur begünstigt. Bekannt ist die Aenderung des Korns beim Eisen, wenn es längere Zeit auf 600° bis 750° erhitzt wird. Die mechanischen Eigenschaften werden dadurch ungünstig beeinflußt.

Schließlich ist noch im Anschluß an diese Veränderungen die „Forcierkrankheit“ der Metalle zu erwähnen. Durch mechanische Bearbeitung kommen, wie Cohen nachgewiesen hat, alle Metalle in einen Zustand, der instabil ist gegenüber demjenigen, der sich bei freier Kristallisation einstellt. Durch Temperaturerhöhung und „Impfen“ wird der stabile Zustand ausgelöst.

4e) Die elektrischen Eigenschaften der Metalle. α) Das elektrische Leitvermögen (vgl. den Artikel „Elektrizitätsleitung“). Die Metalle sind gute Leiter der Elektrizität. Ihr Widerstand wächst im Gegensatz zu dem der Kohle und der Elektrolyte mit der Temperatur. Der Temperaturkoeffizient ist nahezu gleich dem Ausdehnungskoeffizienten der idealen Gase. Im allgemeinen ist er bei gewöhnlicher Temperatur etwas größer, bei den Metallen Fe und Ni ist die Abweichung ziemlich bedeutend. Von Streintz wurde der Temperaturkoeffizient in Beziehung gesetzt zu der Kubikwurzel aus dem Atomvolumen, also dem Radius der Metallatome.

Der Widerstand kann von den höchsten Temperaturen bis zur Temperatur der flüssigen Luft durch die Formel

$$\sigma = \sigma_0 \, (1 + \alpha\tau + \beta\tau^2)$$

dargestellt werden, wo σ_0 der Widerstand bei 0° ist. Die Konstante β ist für die meisten Metalle von der Größenordnung 10^{-6} und positiv mit Ausnahme einiger Metalle der Platingruppe.

Bei den allertiefsten Temperaturen, wie sie durch flüssigen und festen Wasserstoff

und durch flüssiges Helium erreichbar sind, ergeben sich interessante Abweichungen. In dem Kältelaboratorium von Kamerlingh Onnes in Leiden wurden Untersuchungen an den Metallen Platin, Silber, Gold und Blei ausgeführt. Die Figur 5 zeigt den Verlauf des Widerstands bis —260° (etwa 13° absolut).

Die Kurven stellen die Funktion $y = 0{,}00367\ T - \frac{\sigma}{\sigma_0}$ dar, der Temperaturkoeffizient des Widerstandes ist anfänglich (bei gewöhnlicher Temperatur) größer, im Maximum gleich, nachher kleiner als der der Gase.

Gegen den absoluten Nullpunkt, bei den Temperaturen des flüssigen Heliums nähert sich der Widerstand aller Metalle dem Wert Null. Ebenso verhalten sich die Konglomeratlegierungen, völlig verschieden dagegen die Mischkristallegierungen (vgl. den Artikel „Legierungen").

Das Leitvermögen der Metalle für Elektrizität zeigt, wie schon erwähnt wurde, interessante Beziehungen zu den optischen Eigenschaften und zu der Leitfähigkeit für Wärme. Wiedemann und Franz stellten das Gesetz auf: Das Verhältnis der thermischen Leitfähigkeit zur elektrischen ist für alle Metalle konstant. Dieses Gesetz gilt nur angenähert, doch schwanken die Verhältniszahlen immerhin für die meisten Metalle innerhalb nicht zu weiter Grenzen um einen Mittelwert. Die Konstante ist abhängig von der Temperatur, und zwar ist der Temperaturkoeffizient ebenfalls ungefähr gleich dem Ausdehnungskoeffizienten der Gase.

Alle diese Verhältnisse und Beziehungen finden durch die Elektronentheorie eine einfache Erklärung. Wie schon bei der Behandlung der optischen Eigenschaften dargelegt wurde, nimmt diese Theorie eine atomistische Verteilung der Elektrizität an, positive und negative Elementarquanten. Die frei beweglichen negativen Elektronen, die als identisch mit den negativen Teilchen der Kathodenstrahlen angesehen werden, vermitteln die Leitung der Elektrizität und der Wärme. Sie können nach den Gesetzen der kinetischen Gastheorie behandelt werden (vgl. die Artikel „Gase" und „Kinetische Theorie der Materie").

Auf dieser Grundlage wurden von Drude folgende Gleichungen für die Wärme- und Elektrizitätsleitung aufgestellt:

Wärmeleitung:

$$\lambda = \frac{1}{3}\,\alpha . N_e . l . u$$

Elektrizitätsleitung:

$$\sigma = \frac{e^2}{4\,\alpha T} . N_e . l . u$$

hierin ist:
α die bekannte Energiekonstante der kinetischen Gastheorie.
e die Ladung des Elektrons.
N_e die Zahl der Elektronen in der Raumeinheit.
l die freie Weglänge
u die mittlere Geschwindigkeit.

Dividiert man die beiden Gleichungen, so erhält man

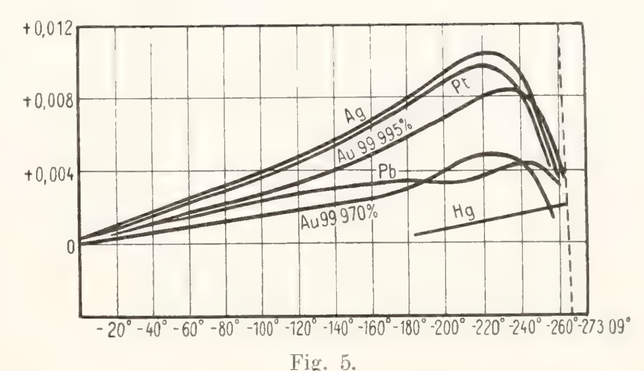


Fig. 5.

$$\frac{\lambda}{\sigma} = \frac{4}{3}\left(\frac{\alpha}{e}\right)^2 . T$$

Durch diese Formel ist die Konstanz des Verhältnisses für alle Metalle gegeben, da die rechte Seite keine individuelle Konstante enthält, und außerdem folgt daraus die Proportionalität zur absoluten Temperatur.

Die zur Erklärung der metallischen Elektrizitätsleitung und ihrer Beziehungen zur Wärmeleitung und den optischen Erscheinungen eingeführte atomistische Theorie der Elektrizität oder Elektronentheorie findet eine experimentelle Stütze in den Erscheinungen der Elektronenstrahlung (Kathodenstrahlen, Elektronenstrahlung erhitzter Metalle, Zerfall der radioaktiven Substanzen) und der Ionenbildung.

β) Die Elektronenstrahlung erhitzter Metalle (vgl. den Artikel „Glühelektrische Erscheinungen"). Erhitzte Metalle und einige Metalloxyde (besonders die Erdalkalioxyde) besitzen die Fähigkeit, positiv und negativ geladene Teilchen auszusenden. Die Erscheinung ist von der Temperatur, von der Art des Metalls und von der des umgebenden Gases abhängig. Am besten wird sie im Vakuum beobachtet.

Die Abhängigkeit von der Temperatur ist zunächst derart, daß bei niederen Temperaturen, von 250° bis 300° an, fast alle

Metalle positiv geladene Teilchen emittieren, während bei höheren Temperaturen (helle Rotglut und Weißglut) eine negative Strahlung stattfindet. Weiterhin ist die Intensität der negativen Strahlung eine Funktion der Temperatur.

Das Verhältnis $\frac{e}{m}$ (elektrische Ladung :Masse) ist bei den positiven Teilchen von derselben Größenordnung wie bei den Ionen, bei den negativen Teilchen dasselbe wie bei den Kathodenstrahlen.

Eigentümlich ist die Wirkung des Wasserstoffs auf die Strahlung. In einer Wasserstoffatmosphäre emittieren die Metalle schon bei tieferen Temperaturen negative Elektronen und laden sich positiv, im Gegensatz zu dem Verhalten in anderen Gasen.

Die Emission wird durch ultraviolette Bestrahlung erleichtert.

γ) Der Zerfall der radioaktiven Metalle (vgl. den Artikel „Radioaktivität"). Während die Emission von geladenen Teilchen bei den gewöhnlichen Metallen mit keiner Substanzänderung des strahlenden Körpers verbunden ist, sind durch die Radiumforschung eine Reihe von Metallen entdeckt worden, die bei gewöhnlicher Temperatur einen dauernden Strom von positiven und negativen Teilchen entsenden, während zugleich ein völliger Zerfall der emittierenden Substanz vor sich geht.

Die radioaktiven Muttersubstanzen sind die Elemente Uran und Thor, die unter Emission von positiv geladenen Heliumatomen, Kathodenstrahlen und einer den Röntgenstrahlen verwandten Strahlung über eine Reihe von Zwischenprodukten zerfallen.

Die Reihe des Urans führt über Radium und Polonium vielleicht zum Blei.

δ) Der elektrolytische Lösungsdruck der Metalle. Elektroaffinität. Ionen (vgl. die Artikel „Elektrochemie", „Potential Elektrochemisches" „Elektrische Leitfähigkeit" usw.). Von ganz besonderer Bedeutung sind diejenigen Beziehungen der Metalle zu den „Atomen" der Elektrizität, dem ⊕ und dem ⊖ Elektron, wie sie bei der Berührung von Metallen mit Elektrolytlösungen und bei der Elektrolyse von Salzlösungen beobachtet werden.

Legt man an Metallsalzlösungen eine Potentialdifferenz an, so findet, wie bekannt, nur dann Stromdurchgang statt, wenn dieselbe einen gewissen Betrag überschreitet. Dieser Betrag wird als „Zersetzungsspannung" bezeichnet, er setzt sich additiv zusammen aus den Abscheidungsspannungen der beiden Ionen, des Anions und des Kations. Die Tabelle 18 gibt die Abscheidungsspannung, die auch als „Haftintensität" oder „Elektroaffinität" bezeichnet wird, für die einzelnen Metalle. Die Abscheidungsspannung des Wasserstoffions ist dabei =0 gesetzt:

Tabelle 18.

Natrium	(+ 2,89) Volt
Magnesium	+ 1,4? „
Aluminium	+ 1,28? „
Mangan	+ 1,08? „
Zink	+ 0,77 „
Eisen[II]	+ 0,64 „
Nickel	+ 0,58 „
Kobalt	+ 0,43 „
Kadmium	+ 0,42 „
Thallium	+ 0,32 „
*Zinn[II]	< + 0,19 „
Blei	+ 0,15 „
Kupfer[II]	— 0,33 „
*Arsen	< — 0,29 „
*Wismut	< — 0,35 „
*Antimon	< — 0,47 „
Quecksilber[I]	— 0,75 „
Silber	— 0,77 „
*Palladium[II]	< — 0,82 „
*Platin	< — 0,94 „
*Gold	< — 1,10 „

Die aus den Zersetzungsspannungen für die einzelnen Metalle abgeleiteten „Haftintensitäten" oder „Elektroaffinitäten" sind keine konstanten Größen, sie sind abhängig von der Konzentration der Lösung: aus konzentrierten Lösungen werden die Metalle leichter abgeschieden als aus verdünnten. Die Werte der Tabelle beziehen sich in der Mehrzahl auf an Metallionen normale Lösungen. Bei den mit einem Stern bezeichneten Metallen ist die Ionenkonzentration unsicher, die Werte sind negativer als die angegebenen. Die Zahl für Natrium ist aus der Wärmetönung berechnet.

Diese Verhältnisse finden eine einfache Erklärung durch die Anschauung von Nernst, daß es sich bei der Elektrolyse und ebenso bei dem umgekehrten Vorgang, der Stromerzeugung in den galvanischen Elementen, um das Gegenspiel zweier Tendenzen handelt, des „elektrolytischen Lösungsdrucks" der Elektrodensubstanzen und des „osmotischen Gegendrucks" der Ionen. Wie die Metalle bei erhöhter Temperatur positiv geladene Teilchen in Gasräume emittieren, so besitzen sie nach Nernst im Kontakt mit geeigneten Flüssigkeiten diese Fähigkeit schon bei gewöhnlicher Temperatur: sie suchen zum Teil mit enormen Kräften mit positiver Ladung in Lösung zu gehen. Andererseits suchen die Ionen an den Elektroden ihre Ladungen abzugeben: es handelt sich um kinetische Gleichgewichtszustände.

Die Werte für die einzelnen Metalle sind nur unter gewissen Voraussetzungen (siehe

Abegg und Bodländer, Ztschr. f. anorg. Chem. 20) miteinander vergleichbar und stellen nach dem Gesagten offenbar kein direktes Maß dar für die Festigkeit der Bindung von Atom und Elektron. Aus diesem Grunde ist wohl auch der Ausdruck „Elektroaffinität" der Bezeichnung „Haftintensität" vorzuziehen. Immerhin aber hat sich die Elektroaffinität als eine Eigenschaft erwiesen, die in hohem Grade geeignet ist, die Elemente in ihrem ganzen Verhalten zu charakterisieren und als Grundlage einer Systematik der anorganischen Verbindungen zu dienen, wie dies von Abegg und Bodländer entwickelt worden ist (vgl. „Literatur").

Aus den Begriffen des Lösungsdrucks und des Ionengegendrucks geht sofort hervor, wie sich Metalle bei Berührung mit Lösungen verhalten werden. Zunächst mit Lösungen, die ein Salz des Metalls enthalten. Je nach der Konzentration der Lösung wird sich das Metall auflösen oder niedergeschlagen werden oder es wird keines von beiden geschehen, das Metall wird sich negativ oder positiv laden oder es wird neutral bleiben. Sind andere Ionen in der Lösung vorhanden, so findet eine minimale Ausfällung immer statt: dem ausfällenden Metall steht ja anfänglich kein Ionendruck gegenüber. Damit eine erhebliche Ausfällung stattfindet, sind größere Differenzen der Lösungsdrucke erforderlich, da infolge der Konzentrationsänderungen das ausfällende Metall immer schwerer in Lösung geht, das auszufällende immer schwerer ausfällt.

Von besonderem Interesse ist die Entwickelung von Wasserstoff durch die Metalle. Damit ein Metall Wasserstoff entwickelt, muß zunächst seine Potentialdifferenz gegen die Lösung größer sein als die des Wasserstoffs: Umgekehrt können die edleren Metalle durch Wasserstoff aus ihren Lösungen ausgefällt werden. Es kommt aber außerdem noch die „Ueberspannung" und eine Reihe anderer Momente in Betracht (vgl. die Artikel „Elektrochemie" und „Potential, Elektrolytisches"). Gegen das Wasser sind die meisten Metalle praktisch indifferent, durch die Alkalimetalle wird dasselbe lebhaft zersetzt.

Wenn die Metalle selbstständige Ionen bilden, so sind es immer positiv geladene: die schärfste Abgrenzung der Metalle gegen die Nichtmetalle geschieht auf Grund ihres elektrolytischen Verhaltens: Metalle sind Elemente, die als selbständige Ionen zur Kathode wandern. Die Metalle vermögen aber außerdem in komplexe Ionen, positive und negative, einzutreten und können dann auch zur Anode gehen: Dies ist z. B. der Fall bei den komplexen Eisensalzen $K_4^{\cdots\cdot}(CN)_6Fe_{II}''''$ und $K_3^{\cdots}(CN)_6Fe_{III}'''$.

Die Elektroaffinität zeigt deutliche Beziehungen zum periodischen System und besonders zum Atomvolum (vgl. die Kurve Fig. 2 und Tab. 1). Die Verwandtschaft zum ⊕ Elektron nimmt regelmäßig ab, wenn man in den Perioden von links nach rechts geht. Dies gilt im ganzen sowohl für die kleinen wie für die großen Perioden des Systems, im einzelnen aber zeigen sich Verschiedenheiten. In den kleinen Perioden wird in der Mitte (C, Si) ein Indifferenzpunkt erreicht, von da ab wächst die Affinität zum ⊖ Elektron, die bei den Halogenen den höchsten Wert erreicht. In den großen Perioden ist der Gang ein anderer und komplizierterer infolge der doppelten Periodizität (Haupt- und Nebenserien) und infolge einer weiteren Gesetzmäßigkeit, nach welcher in den großen Perioden mit den hohen Atomgewichten und großen Atomvolumen die Verwandtschaft zum ⊕ Elektron eine viel größere ist als in den kleinen Perioden. Hierdurch werden die Indifferenzpunkte nach rechts verschoben und es ergibt sich das Resultat, daß die Gesamtheit der Elemente nicht zu gleichen Teilen in Metalle und Nichtmetalle zerfällt, sondern daß die Zahl der Metalle bei weitem überwiegt (50:30).

Während also für die Gesamtheit der Elemente der großen Perioden mit dem größeren Atomgewicht eine größere Positivität verbunden ist, trifft diese Regelmäßigkeit für den Gang im einzelnen nicht durchweg zu: Bei den Alkali- und Erdalkalimetallen (K, Rb, Cs, Ca, Sr, Ba) steigt die ⊕ Elektroaffinität mit Atomgewicht und -volum, bei den Metallen der Nebenserien dagegen (Cu, Ag, Au — Zn, Cd, Hg) nimmt sie mit steigendem Atomgewicht ab.

Für die der Regel entsprechenden Elemente ergibt sich eine anschauliche Vorstellung, wenn man mit Nernst das Atom als einen Kondensator betrachtet: mit steigendem Atomgewicht wächst die Dichte und das Volum der Atome und damit die Kapazität des Kondensators, die Spannung der Elektrizität wird bei gleicher Ladung geringer, das Elektron haftet fester am Atom. Aus dieser Anschauung heraus kann eine Reihe von Eigenschaften der Metallsalze und -ionen erklärt werden: Löslichkeit, Dissoziationsgrad, Bildung von Komplexionen usw. Es zeigt sich eine weitgehende Uebereinstimmung mit der Erfahrung (Abegg und Bodländer).

ε) Die thermoelektrischen Eigenschaften der Metalle (vgl. den Artikel „Thermoelektrizität"). Eine weitere elektrische Eigenschaft der Metalle, die ebenfalls durch die Elektronentheorie eine einfache Erklärung findet, ist die Thermoelektrizität. Während im allgemeinen in einem System verschiedenartiger metallischer Leiter kein Strom entstehen kann, weil alle Potentialdifferenzen sozusagen „symmetrisch" wirken, erhält man eine Bewegung der Elektrizität, wenn man eine Verbindungsstelle des Systems auf eine

höhere Temperatur bringt als die übrigen. Ueber die Richtung des Stromes gibt die „thermoelektrische Spannungsreihe“ Auskunft:

+Wismut, Quecksilber, Platin, Gold, Kupfer, Zinn, Blei, Silber, Antimon. —

Bildet man aus zwei Metallen dieser Reihe einen Stromkreis und erwärmt eine Verbindungsstelle, so geht immer der Strom durch diese Verbindungsstelle in der Richtung vom vorhergehenden zum nachfolgenden Metall. Umgekehrt findet eine Abkühlung der Verbindungsstelle statt, wenn ein Strom in der angegebenen Richtung durch die Verbindungsstelle geschickt wird: Peltiereffekt. Diese Erscheinungen ordnen sich dem Prinzip von Le Chatelier unter, nach dem bei einem Eingriff in ein System immer die Reaktion eintritt, welche die Wirkung des Eingriffs abschwächt (Erhitzung — Reaktion: Abkühlung durch den elektrischen Strom an der Lötstelle; Anlegen einer Potentialdifferenz — Reaktion: Verminderung des Stroms durch Erzeugung einer elektromotorischen Gegenkraft in der abgekühlten Lötstelle).

Die thermoelektrischen Kräfte sind in erster Annäherung der Temperatur der Lötstellen proportional, in den meisten Fällen erhält man, wenn sich die eine Lötstelle auf 0° befindet, eine weitgehende Annäherung durch die Gleichung:

$$(AB)_\tau = \alpha\tau + {}^1\!/_2\beta\tau^2,$$

für 1° Temperaturdifferenz erhält man als eigentliche thermoelektrische Kraft:

$$e = \frac{d(AB)}{d\tau} = \alpha + \beta\tau$$

Die E. M. K. zwischen zwei Metallen ist gegeben, wenn man ihre Potentialdifferenz gegen ein Bezugsmetall kennt.

$$E_{AC} - E_{BC} = E_{AB}.$$

Die Tabelle 19 gibt die α- und β-Werte einiger Metalle gegen Blei in Mikrovolt.

Die thermoelektrischen Kräfte sind gering: Hundertstel und Tausendstel Millivolt für 1° Temperaturdifferenz. Verwandte Metalle zeigen im allgemeinen geringe Thermokräfte, doch ergeben sich keine durchsichtigen Beziehungen.

Die Elektronentheorie sieht die Ursache der Thermokraft in dem verschiedenen Gehalt der Metalle an freien Elektronen. Diese können, wie schon früher erwähnt wurde, kinetisch wie Gase behandelt werden: bei thermischer Asymmetrie ergeben sich Druckdifferenzen und elektrische Ströme.

Tabelle 19.

	α	β
Li	+ 11,6	+ 0,039
Na	— 4,4	— 0,021
Cu	+ 2,8	+ 0,008
Ag	+ 2,3	+ 0,0076
Au	+ 2,8	+ 0,0064
Mg	— 0,12	+ 0,002
Zn	+ 2,5	+ 0,016
Cd	+ 3,0	+ 0,034
Hg	— 3,17	— 0,0173
Sn	— 0,17	+ 0,002
*Sb ⊥	+ 26,4	—
*Sb ‖	+ 22,6	—
*Bi ⊥	— 45,5	— 0,60
*Bi	— 127,4	— 0,70
Fe	+ 13,4	— 0,03
Pt	— 3,0	— 0,021

5. Die chemischen Eigenschaften der Metalle. Das Verhalten gegen andere Elemente und gegen Verbindungen. Für die Beziehungen der Metalle zu anderen Elementen ergibt sich aus dem Begriff der Elektroaffinität ein einfaches Einteilungsprinzip: man hat nach Abegg und Bodländer zu unterscheiden zwischen homöopolaren und heteropolaren Elementen. Die Unterschiede der Polarität sind gegeben durch den Horizontalabstand im periodischen System (Anordnung von Staigmüller, Tab. 1): homöopolare Elemente haben geringen Horizontalabstand, sie werden durch viele schwache Valenzen von wechselnder Zahl — Kontravalenzen — zusammengehalten, heteropolare Elemente haben großen Horizontalabstand, sie werden durch wenige starke Valenzen von konstanter Zahl — Normalvalenzen — zusammengehalten. Für jedes Element beträgt die Summe von Normal- und Kontravalenzen 8, die Kontravalenzen werden in wechselnder Zahl betätigt.

Die heteropolaren Verbindungen der Elemente werden als Salze bezeichnet, die homöopolaren Verbindungen der Metalle sind die Legierungen.

5a) Das Verhalten zu den homöopolaren Elementen. Legierungen (vgl. den Artikel „Legierungen“). Die Verbindungen der Metalle untereinander werden als Legierungen bezeichnet Sie stellen alle möglichen Typen von durch schwache Affinitäten zusammengehaltenen Verbindungen dar: flüssige Lösungen, feste Lösungen, Verbindungen von wechselnder Valenz, in denen der Charakter der Komponenten erhalten ist, alle diese Systeme werden von der chemischen Lösungstheorie unter demselben Gesichtspunkt betrachtet. (Eine eingehende Behandlung der Legierungen siehe in dem Artikel „Legierungen“ und über Anlagerungsverbin-

*) Die Zeichen ⊥ und ‖ beziehen sich auf die Spaltungsrichtungen der Kristalle.

dungen die in der Literatur angeführten Arbeiten von Abegg und Bodländer.)

5b) Verhalten der Metalle zu den heteropolaren Elementen. Salze. Im Gegensatz zu den eben besprochenen Verbindungen bilden die Metalle mit den polar verschiedenen Elementen Verbindungen von „salzartigem" Charakter, die sich in Aussehen und Eigenschaften völlig von den Komponenten unterscheiden.

Mit den Halogenen bilden fast alle Metalle starke Salze, die der Grenzmetalle Antimon und Wismut zeigen weitgehende Hydrolyse, die aber durch Zusatz von Halogenwasserstoffsäuren zurückgedrängt wird. Dieses Verhalten kann zur Unterscheidung von den Nichtmetallen dienen, deren Halogenverbindungen von Wasser völlig zersetzt werden und bei denen dieser Vorgang durch Säurezusatz nicht rückgängig gemacht wird.

In der folgenden Gruppe (Sauerstoff und Schwefel) reicht die Heteropolarität schon nicht mehr aus, um starke „Salze" zu bilden: selbst die Alkalisalze der „Sauerstoffwasserstoffsäure" und der „Schwefelwasserstoffsäure", mit anderen Worten die Alkalioxyde und -sulfide, sind in wässeriger Lösung völlig hydrolysiert, S''-Ion und O''-Ion sind jedenfalls nur in verschwindender Menge vorhanden. Dagegen kann Schwefel durch Aufnahme von Sauerstoff das starke komplexe Anion SO_4'' bilden (Abegg und Bodländer).

Eine besondere Stellung nehmen — ähnlich wie die Wasserstoffsalze oder Säuren — die „primären Salze der Sauerstoffwasserstoffsäure" oder Basen ein, indem sie das OH'-Ion mit dem Wasser gemein haben: dadurch wird die Symmetrie des $H^{\cdot}.OH'$-Ionenproduktes zugunsten der OH'-Ionen verschoben, die Lösung reagiert alkalisch. Auf dieser Erscheinung beruht die eigentliche chemische Definition der Metalle: Metalle sind Elemente, deren Sauerstoffverbindungen in wässeriger Lösung alkalisch reagieren.

Diese Definition ist mit Rücksicht auf die Metalle, deren höhere Oxyde sauren Charakter besitzen (Chrom, Mangan), dahin zu präzisieren, daß mindestens ein Oxyd basisch sein muß.

Noch geringer ist die Heteropolarität bei Stickstoff, Phosphor, Kohlenstoff. Die Nitride, Phosphide, Carbide sind gegen Wasser völlig unbeständig, durch Aufnahme von Sauerstoff können auch hier mehr oder weniger starke Anionen gebildet werden — Nitrate, Phosphate, Carbonate.

5c) Verhalten der Metalle zu Verbindungen. Verhalten zu festen Körpern, Flüssigkeiten, Gasen. Bei dem Verhalten der Metalle zu Verbindungen handelt es sich um einfache Lösung oder um Zersetzung. Man unterscheidet zweckmäßig zwischen dem Verhalten zwischen dem Verhalten zu festen Körpern, zu Flüssigkeiten und zu Gasen.

Das Verhalten der Metalle zu festen Körpern wird unter normalen Verhältnissen durch den Grundsatz bestimmt: corpora non agunt nisi fluida. Durch hohen Druck und hohe Temperatur sowie durch abnorm große Affinität werden Ausnahmen geschaffen: Herstellung von Legierungen unterhalb des Schmelzpunktes durch Druck- und Temperatursteigerung, Reduktionen durch die Alkalimetalle bei gewöhnlicher Temperatur, durch Aluminium beim Erhitzen (Aluminothermie).

Das Verhalten der Metalle zu Flüssigkeiten ist zum Teil bei der Darlegung der elektrolytischen Verhältnisse behandelt worden. Es handelte sich dort nicht um die Löslichkeit der Metalle, sondern um die der Metallionen und -salze. Die eigentlichen Lösungsmittel für Metalle sind die Metalle selbst. Die Lösungen der Metalle in Quecksilber zeigen alle Kennzeichen der wirklichen Lösungen, die Metalle sind darin in atomarem Zustand gelöst (weiteres s. in dem Artikel „Legierungen").

Neben den wässerigen und metallischen Lösungen sind noch die „kolloidalen" Lösungen zu erwähnen. Durch chemische Reduktion von Salzlösungen, durch elektrische Zerstäubung in einem unter Wasser oder einem anderen „Dispersionsmittel" erzeugten Lichtbogen, durch Bestrahlung mit ultraviolettem Licht, kann man Metallsuspensionen von „submikronischer" und „amikronischer" Feinheit erzeugen. Die Submikronen können mit dem Ultramikroskop beobachtet werden, die Amikronen erst, nachdem sie durch Anlagerung von Metallteilchen aus einer Reduktionslösung, wobei sie als „Kerne" wirken, „gemästet" worden sind. Durch Anwendung von indifferenten Lösungsmitteln, tiefen Temperaturen und Ausschluß von Sauerstoff ist es gelungen, kolloidale Lösungen auch von den Alkalimetallen herzustellen. Die Metallkolloide sind „irreversibel", d. h. sie gehen nicht mehr in Lösung, wenn sie einmal ausgefällt sind. Neuerdings scheint es aber Kužel gelungen zu sein, Metallgele zu „peptisieren", d. h. löslich zu machen.

Bei dem Verhalten der Metalle gegen Gase ist zu unterscheiden zwischen dem Verhalten gegen elementare Gase (H_2, Cl_2) und dem gegen zusammengesetzte (SO_2, CO_2, CO). Auf die einfachen Gase finden natürlich die oben dargelegten Grundsätze der Homöo- und Heteropolarität Anwendung:

Wasserstoff wird von Platin und Palladium unter Bildung von festen Lösungen von metallischem Charakter absorbiert, in Chlor verbrennen die Metalle zu Chloriden. Die zusammengesetzten Gase werden häufig unter Zersetzung absorbiert, z. B. die schweflige Säure unter Bildung von Oxyden und Sulfiden, die wiederum gemischt einen SO_2-Druck ergeben; es stellen sich Gleichgewichte ein. Von besonderem Interesse sind die Beziehungen der Kohlensäure und des Kohlenoxyds zum Eisen wegen ihrer Bedeutung für den wichtigsten metallurgischen Prozeß, den Hochofenprozeß.

Metallisches Eisen wird von CO_2 oxydiert, die gebildeten Oxyde werden von CO reduziert, bei einem bestimmten Mischungsverhältnis der Gase stellt sich Gleichgewicht ein

$$\frac{x}{1-x} = \eta$$

(x=% CO). Außerdem kann noch Eisencarbid (Fe_3C) gebildet werden.

Eigentümliche Reaktionen finden statt zwischen Kohlenoxyd und den Metallen Eisen und Nickel, es entstehen CO-Verbindungen von der Form $Me(CO)_x$, z. B. $Fe(CO)_7$, $Fe(CO)_5$, $Ni(CO)_4$. Die wichtigste von ihnen ist das Nickelcarbonyl $Ni(CO)_4$, eine wasserhelle Flüssigkeit, die bei 40° siedet und bei höheren Temperaturen in Nickel und Kohlenoxyd zerfällt. In einem mit Nickelkohlenoxyddampf gefüllten zugeschmolzenen Rohr scheidet sich beim Erhitzen ein Nickelspiegel ab, der bei Zimmertemperatur wieder verschwindet. Man hat ein Gleichgewicht, das durch die Formel

$$\frac{C_{CO}^4 \cdot C_{Ni}}{C_{Ni(CO)_4}} = K$$

bestimmt ist (vgl. den Artikel „Chemisches Gleichgewicht"). Hieraus ergibt sich in dem bivarianten Gleichgewicht die folgende Beziehung zwischen dem Gesamtdruck P und dem Grad des Zerfalls x:

$$\frac{x^4}{1-x} \cdot P^3 = K.$$

Je höher der Druck, desto geringer der Zerfall.

5d) Die katalytischen Wirkungen der Metalle. Schließlich sind noch die katalytischen Wirkungen der Metalle zu erwähnen. Unter Katalyse versteht man die Beschleunigung oder Auslösung von Reaktionen, die auch ohne den Katalysator, aber mit geringer oder unendlich kleiner Geschwindigkeit vor sich gehen würden. Der Katalysator bleibt hierbei in seiner Masse unverändert, er beteiligt sich höchstens vorübergehend durch Bildung von Zwischenprodukten an der Reaktion, in vielen Fällen scheint eine rein physikalische Wirksamkeit vorzuliegen.

Ihre Hauptanwendung haben die Katalysatoren in der organischen Chemie, doch stehen den zahlreichen Beispielen katalytisch beeinflußter organischer Reaktionen unter den wenigen anorganischen einige von ganz besonderer praktischer Bedeutung gegenüber: Die Oxydation von schwefliger Säure zu Schwefeltrioxyd unter Mitwirkung von fein verteiltem Platin in dem Schwefelsäurekontaktverfahren und die Auslösung des Kohlenoxydzerfalls durch die Metalle der Eisengruppe — Nickel, Cobalt, Eisen, Mangan —, die für den Hochofenprozeß von so großer Bedeutung ist.

Der Zerfall erfolgt nach der Gleichung

$$2CO \rightleftarrows C + CO_2$$

er wird geregelt durch das Massenwirkungsgesetz

$$\frac{C_{CO}^2}{C_C \cdot C_{CO_2}} = \text{konst.}$$

und ergibt die folgende Beziehung des Gesamtdrucks P zum CO-Gehalt x:

$$\frac{x^2}{1-x} \cdot P = \zeta$$

Diese Gleichgewichtsbedingung kombiniert sich mit der früher für Eisen und seine Oxyde in Berührung mit einer $CO—CO_2$-Atmosphäre gefundenen:

$$\frac{x}{1-x} = \eta$$

zu der Bedingung für das totale Gleichgewicht: Eisen, Eisenoxyd, Kohle, Kohlenoxyd, Kohlensäure.

$$P = \zeta \cdot \frac{1+\eta}{\eta^2}.$$

Die Bedeutung der Katalysatoren für die organische Chemie war bis vor zwei Jahrzehnten gering, erst durch die Arbeiten von Sabatier und die daran sich anschließenden Forschungen wurde eine ganze Reihe von katalytisch beeinflußbaren pyrogenen und feuchten Reaktionen aufgefunden. Die Katalysatoren bewirken die Aufnahme von Wasserstoff (Reduktionen) und von Sauerstoff (Oxydationen) und auch die Spaltung und Vereinigung von Molekülen und Molekülresten. Ganz besondere katalytische Eigenschaften besitzt das Nickel.

Einzelne wichtige Reaktionen sind: die Kondensation des Acetylens zu Benzol und anderen Kohlenwasserstoffen, die Reduktion des Acetylens und Aethylens zu Aethan, die Reduktion des Benzols zu Cyclohexan, die Darstellung von Erdöl aus Acetylen, die Bildung von Methan aus CO, CO_2 und Wasserstoff, die Oxydation von Alkoholen zu Ketonen und Aldehyden (Katalysator Kupfer), die Bildung von Ketonen aus Carbonsäuren (Katalysator Zink).

Sehr wichtig wegen der bequemen Anwendung der Methode sind die von Paal aufgefundenen katalytischen Wirkungen der kolloidalen Metalle (Hydrosole der Metalle

der Platingruppe: Platin, Palladium, Osmium, Iridium).

Die Wirkungsfähigkeit der Katalysatoren ist zum Teil enorm: die Zersetzung des Wasserstoffsuperoxyds durch kolloidales Platin ist nach Bredig noch bei einer Verdünnung von $^1/_{70\,000\,000}$ Mol im Liter merklich. Die Katalysatoren sind gegen gewisse Stoffe (Schwefelwasserstoff, Arsen, Blausäure) sehr empfindlich, sie werden dadurch vergiftet. Dieses Verhalten veranlaßte Bredig, die kolloidale Platinlösung geradezu als „anorganisches Ferment" zu bezeichnen.

Literatur. ***W. Nernst***, *Theoretische Chemie. Stuttgart 1909.* — ***R. Schenck***, *Physikalische Chemie der Metalle. Halle 1909.* — ***Müller-Pouillet***, *Lehrbuch der Physik. Braunschweig 1909.* — ***R. Abegg***, *Handbuch der anorganischen Chemie. Leipzig 1905.* — ***A. Ditte***, *Introduction à l'étude des métaux. Paris 1902.* — ***K. Bädeker***, *Die elektrischen Erscheinungen in metallischen Leitern. Braunschweig 1911.* — ***The Svedberg***, *Methoden zur Herstellung kolloider Lösungen. Dresden 1909.* — ***E. Riecke***, *Anschauungen über das Wesen des metallischen Zustandes. Zeitschr. f. Elektrochemie* ***15***, *473. 1909.* — ***W. Nernst***, *Zur Theorie der spezifischen Wärme. Zeitschr. f. Elektrochemie* ***17***, *265. 1911.* — ***Abegg und Bodländer***, *Die Elektroaffinität der Metalle. Zeitschr. f. anorganische Chemie* ***20***, *453. 1899;* ***39***, *330. 1904.* — ***J. Traube***, *Die Eigenschaften der Stoffe als Funktionen der Atom- und Molekularräume. Zeitschr. f. anorganische Chemie* ***40***, *372. 1904.* — ***W. Biltz***, *Schwingungszahl und periodisches System. Zeitschr. f. Elektrochemie* ***17***, *670. 1911.* — ***R. Schenck***, *Elektronentheoretische Studien an festen Lösungen. Ann. Phys.* ***32***, *261. 1910.* — ***Hagen und Rubens***, *Reflexionsvermögen und elektrisches Leitvermögen der Metalle. Ann. Phys.* ***11***, *873. 1903.* — ***Kamerlingh-Onnes***, *Widerstand der Metalle bei Heliumtemperaturen. C. B. II, 350. 1911.* — ***Cohen und Inouye***, *Die Metastabilität unserer Metallwelt. Zeitschr. f. physikalische Chemie* ***71***, *301. 1910.* — ***Taub***, *Metalle als Katalysatoren. Zeitschr. f. angewandte Chemie 145, 1910.* — ***Greenwood***, *Dampfdruckkurve schwerflüchtiger Metalle. Zeitschr. f. physikalische Chemie* ***76***, *484. 1911.* — ***H. v. Wartenberg***, *Schmelzpunkt des reinen Wolframs. Berl Ber.* ***40***, *3, 3287. 1907.*

A. Stirm.

Metalloidorganische Verbindungen

siehe den Artikel „Organische Verbindungen der Metalle und Nichtmetalle".

Metallorganische Verbindungen

siehe den Artikel „Organische Verbindungen der Metalle und Nichtmetalle".

Metamorphose.

Metamorphose der Gesteine bezeichnet die Umwandelung, welche Sedimente und Eruptivgesteine unter dem Einflusse gesteigerter Temperatur und gesteigerten Druckes erleiden (siehe den Artikel „Mineralbildung").

Metazoa.

Metazoen nennt man alle vielzelligen Tiere im Gegensatz zu den Einzellgen (Protozoen), zwischen welche letzteren (ob mit Recht, ist fraglich) die Mesozoen (vgl. diese) gestellt werden. Eingeteilt werden die Metazoen gewöhnlich in die folgenden neun Abteilungen (Typen): 1. Porifera (Schwämme), 2. Coelenterata (Hohltiere), 3. Vermes (Würmer), 4. Arthropoda (Gliedertiere), 5. Mollusca (Weichtiere), 6. Molluscoidea, 7. Echinodermata (Stachelhäuter), 8. Tunicata (Manteltiere), 9. Vertebrata (Wirbeltiere). Vgl. im Artikel „Zoologie" die zoologische Systematik.

Meteoriten.

1. Geschichtliches. Das Erscheinen von Kometen, Sternschnuppen und Feuerkugeln am nächtlichen wolkenlosen Himmel hat zu allen Zeiten das Erstaunen und das Entsetzen der Menschen in hohem Grade hervorgerufen. Von den genannten ungewöhnlichen, rasch auftauchenden und wieder verschwindenden Feuerkörpern, die von vielen als zusammengehörige Erscheinungen angesehen werden, was aber durchaus nicht sicher erwiesen ist, kommen nur die Feuerkugeln in den Bereich der Erde. Sie durchqueren den Luftkreis oder sie werden bei günstiger Flugrichtung von ihr aufgefangen, und was an festen Massen aus ihnen auf die Oberfläche der Erde fällt, bezeichnen wir als Meteoriten. Je nach den Vorstellungen, die man sich von den aus dem Weltraume herabgestürzten Massen machte, hat man sie auch Donnersteine, Luftsteine, Mondsteine, Himmelsteine, Bäthylien (beseelte Steine) oder auch Aerolithen genannt. Heute gebraucht man allgemein den Namen Meteoriten.

Die Nachrichten und Spuren über das

Niederfallen von Meteoriten lassen sich durch mehrere Jahrtausende zurückverfolgen bis in die vorgeschichtliche Zeit, aus der sich Eisenmeteoriten als Beigabe in Grabstätten oder in Ruinen auf Altären vorgefunden haben (Hopewell Mound in Ohio, Casas Grandes in Chihuahua, Mexiko).

In dem Morgenlande, wo die Verehrung des Feuers mit den gewaltigen Feuerkräften in den Gestirnen personifiziert wurde, auf denen mächtige Geister den Lauf der Welt lenken, wurden die aus den Feuermeteoren fallenden Steine für die herabgefallenen Sterne selbst gehalten und der göttlichen Verehrung zugeführt. Ein Stein dieser Art ist noch jetzt der schwarze Stein in der Kaaba zu Mekka, Hadschar el Aswad genannt, und das Ancyle der Römer gewesen, gefallen zur Zeit des Numa Pompilius, von dem die Sybillinischen Bücher berichten, sein Verlust werde der Vorbote des Untergang's Roms sein. Im Besitze von Privaten wurden kleinere Steine als Hausorakel verehrt. In Kleinasien und Griechenland wurden die Meteoriten als Symbole der Götter angesehen, die sie den Menschen zur Verehrung auf die Erde herabsenden. Als Symbole des Sonnengottes, der Diana und als Bildnisse der Mutter der Götter sind in Emesa in Syrien, zu Ephesus, Pessinus in Phrygien, in Erethrea und in Theben Meteorsteine angebetet worden. Aus Arabien sind Degenklingen aus Meteoreisen bekannt, die dem Besitzer Unverwundbarkeit verleihen sollen, ebenso aus Indien wo 1621 der Mongolen Kaiser Dschehangir aus Meteoreisen Säbel, Dolch und Messer fertigen ließ. Gleiches geschieht heute noch im Auftrage des Sushuhunan (Kaiser) von Solo auf Java, der von seinem Hofschmiede Dolche (Kris) mit Meteoreisenpamor aus dem Eisen von Prambanan herstellen läßt, welche ihm zu fürstlichen Geschenken dienen (5 Kris in der ethnographischen Abteilung des naturhistorischen Hofmuseums in Wien).

Aus dem weiteren Osten, aus China sind seit 2600 Jahren genaue Aufzeichnungen über das Erscheinen von Meteoren und Steinfällen vorhanden, die von Matualin gesammelt wurden. Die Chinesen nannten sie in Steine verwandelte Sterne, weil sie sich den Augen wie Sterne zeigen, ohne sie aber für echte Sterne zu halten, was aus einem Berichte an den Kaiser Wen-tsoung über den Meteoritenfall von Hong-Lie in Korea hervorgeht, worin es heißt, das Herabfallen von Steinen sei schon unter den früheren Dynastien mehrmals vorgekommen und sei kein Wunder, das auf Glück oder Unglück deute. Ebenso finden sich in Japan reiche Aufzeichnungen über meteorische Erscheinungen. Von den Griechen und Römern haben wir Nachrichten von Meteoritenfällen bis auf 3000 Jahre zurück.

Anaxagoras und Plutarch sowie Plinius berichten über den Fall eines großen Steines am Flusse Aegos in Thrakien im Jahre 465 v. Chr., dessen Größe einem Wagen gleich gekommen sei. Ferner wurde nach beglaubigten Nachrichten in Delphi ein von Saturn herabgeschleuderter Stein aufbewahrt. Nicht unbeachtet dürfen zwei Verse der Ilias bleiben (15. Buch Zeile 31—32), die in der Uebersetzung von Voß fehlen, aber bei Heyne (II. I. VII. p. 12) vorhanden sind, und folgendermaßen lauten: „Dann dir erst löst ich die Füße, die Klumpen aber nach Troja warf ich hinab, noch späten Geschlechtern die Tat zu verkünden."

„Und man sagt daß die Periegeten (Fremdenführer) noch diese Klumpen, auch ‚Ambosse von oben' genannt, zeigen." So berichtet Eusthatius, 1115 Bischof von Thessalonich, was so viel besagt, daß zu Zeiten Homers zwei Eisenmassen bekannt waren, die zwei Jahrtausende später noch gezeigt wurden.

Auch aus dem Abendlande berichten alte Chronisten das Herabfallen von Steinen als eine feststehende Tatsache. Allmählich verlor sich hier aber die freundliche Auffassung der Morgenländer, denn der Schrecken, den das ungewöhnliche Phänomen in der Brust zurückließ, trat so sehr in den Vordergrund, daß man einen Meteoriten nicht mehr als ein Zeichen des Wohlwollens, sondern vielmehr des Zornes der Gottheit anzusehen begann, und schon Tacitus erwähnt die Steinfälle als ein Vorzeichen nahenden Unglücks.

Mit den aufsteigenden Jahren mehrten sich die düsteren Auffassungen über die Steinfälle und der Fall des Steines bei Ensisheim im Elsaß 1492 (der erste Fall von dem Bruchstücke in den Sammlungen vorhanden sind), zur Zeit des Vordringens der Osmanen in Europa, wurde zur Aufreizung der Christenheit gegen die Türken ausgenutzt und nach einer Urkunde sollte der Steinfall bei Osterau (1671) „ ein Zorneszeichen des Höchsten und ein Prognostikon sein der steinern Türken Hertzen und grimmigen Hundesart, die sie gegen das teure Christenblut zu verüben pflegen." Später scheint es nun, daß die in den Berichten von geschreckten Augenzeugen enthaltenen Entstellungen und Uebertreibungen als Ausbruch einer krankhaften Phantasie angesehen wurden. Die Physiker unterließen es, die so sehr übereinstimmenden Nachrichten aus älteren und neueren Zeiten zu prüfen, und schließlich wurde gerade zur Zeit als die Aufklärung von Frankreich aus verkündigt wurde, jeder für einen Toren erklärt, der ein Herabfallen von Steinen für möglich hielt. Der Unglaube greift soweit um sich daß in öffentlichen Sammlungen

aufbewahrte Meteorsteine weggeworfen wurden (Dresden), um nicht als unaufgeklärt zu gelten. Der Unglaube der damaligen Gelehrten ging so weit, daß eine Kommission der französischen Akademie, in der auch Lavoisier sich befand, den Meteoriten von Lucé am 13. September 1768 für eine Art Eisenkies erklärte und als später der Fall bei Barbotan 24. Juli 1790 sich ereignete, wurde das Ereignis, trotz eines objektiven Berichtes des Professors Baudin und protokollarischer Beglaubigung des Bürgermeisters, von den Gelehrten nicht anerkannt und Bertholon berichtete über den Vorfall im Journal des sciences utiles mit folgenden Worten: „Wie traurig ist es eine ganze Munizipalität durch ein Protokoll in aller Form Volkssagen bescheinigen zu sehen, die nicht nur von den Physikern, sondern von allen Vernünftigen zu bemitleiden sind.“ Der um diese Zeit in Wien wirkende, angesehene Vizedirektor des neu gegründeten Hofmineralienkabinetts X. Stütz schrieb angesichts des „Kloßes“ gediegen Eisen von Agram (1751), über dessen Fall das älteste Meteoritenprotokoll noch jetzt im naturhistorischen Hofmuseum vorhanden ist, obgleich er meinte, daß an der Sache wirklich etwas sein möge, doch schließlich die Ansicht nieder: „Freylich, daß in beiden Fällen (Agram und Eichstädt) das Eisen vom Himmel gefallen sein soll, mögen wohl im Jahre 1751 selbst Deutschlands aufgeklärte Köpfe bei der damals unter uns herrschenden schrecklichen Ungewißheit in der Naturgeschichte und der praktischen Physik geglaubet haben, aber in unseren Zeiten wäre es unverzeihlich, solche Märchen auch nur wahrscheinlich zu halten.“ Wir müssen es aber Stütz hoch anrechnen, daß er trotz dieser Ableugnung durch Hinterlegung von fünf Meteoritenfällen (Agram, Tabor, L'Aigle, Mauerkirchen, Eichstädt) den Grundstock zur Wiener Meteoritensammlung gelegt hat.

So genossen allerwärts die Meteoriten gegen Ende des 18. Jahrhunderts keine wissenschaftliche Anerkennung. Dieselbe wurde ihnen erst durch den Physiker Chladni (geboren zu Wittenberg, 30. November 1756 und gestorben 1827 4. April zu Breslau) verschafft. Chladni war ein ungewöhnlich geistreicher Mann, damals auch berühmt durch seine akustischen Erfindungen (Klangfiguren u. a.). Fast beständig auf Reisen hatte er manche Erfahrungen, darunter auch über Meteoriten gesammelt, und als er das von Pallas aus Sibirien mitgebrachte Meteoreisen kennen lernte (nach ihm Pallaseisen genannt), von dessen Niederfall Tartaren erzählten, schrieb er seine berühmte Abhandlung 1794 über den „Ursprung des Pallas- und anderer Eisen“, worin er mit unwiderstehlicher logischer Kraft und Beweisführung für die Abstammung der Meteoritenmassen aus den Feuerkugeln eintrat. Lichtenberg äußerte über die fremdartige Sache „es sey ihm bey dem Lesen der Schrift anfangs so zu Mute gewesen, als wenn ihn selbst ein solcher Stein am Kopfe getroffen hätte“. In wenigen Jahren war der Unglaube an die Meteoriten gebrochen, wenn auch noch manche die neue Lehre als eine licentiam physicam erklärten und die beiden Brüder De Luc in fanatischer Weise gegen Chladni eiferten, von denen einer ihn sogar unter diejenigen rechnet „die alle Weltordnung leugnen und die nicht bedenken wie sehr sie an allem Bösen in der moralischen Welt schuld sind“. Als Chladnis Buch über die „Feuermeteore“ 1819 erschien, waren innerhalb 15 Jahren, in welchem Zeitraume die Fälle von L'Aigle und Stannern sich ereigneten, alle Gegner verstummt.

Schon in den ersten Jahren des 19. Jahrhunderts haben sich die angesehensten Chemiker Bournon, Howard, Klaproth, Vauquelin, Thénard, Strohmeyer, Berzelius und andere mit der Bestimmung der Stoffe in den Meteoriten beschäftigt. Im Jahre 1808 entdeckte in Wien v. Widmannstätten durch Anlassen eines Plättchens von Agram an den Meteoreisen die nach ihm genannten „Widmannstätten'schen Figuren“ und v. Schreibers, Direktor der Kaiserlichen Naturaliensammlung in Wien, veröffentlicht die ersten guten Abbildungen von Meteoriten (1820). Bis zu dieser Zeit waren schon 36 Fallorte in Wien angesammelt, und war der Wiener Meteoritensammlung der fortschrittliche Geist schon damals aufgeprägt worden, der im Wirkungskreise ihrer aufeinander folgenden Direktoren bis auf den heutigen Tag erhalten geblieben ist.

Neben der Verbesserung der chemischen Trennungen durch Wöhler, Smith, Rammelsberg, Shepard, Cohen und viele andere beginnt mit der Ausbildung neuer mineralogischer und petrographischer Methoden, die mineralogische Untersuchung der Meteoriten, die mit Neumann (Neumann'sche Linien der Kamacite) und G. Rose eingesetzt hat.

Auch in dieser Periode wurde von Wien aus die Meteoritenwissenschaft nachhaltigst gefördert. Hier wirkte Partsch, schrieb v. Reichenbach seine glänzenden Aufsätze (fast sämtliche in Pogg. Ann.), publizierte Haidinger seine Beobachtungen in der Akademie und begann Tschermak die mikroskopische Untersuchung der Meteorsteine und ihrer Struktur und ersann seine auf reiche Erfahrung gegründete Hypothese über die Herkunft der Meteoriten. Im selben Zeitraume macht Daubrée experimentelle Studien über die künstliche Herstellung der Meteoriten und über die Oberfläche der Meteor-

eisen, und vergleicht das meteorische Material mit irdischen Steinen, und schließt auf planetarische Abkunft der Meteoriten. Fouqué und Lévy erzeugen künstliche den meteorischen Eukriten ähnliche Gesteine. In England wirkt Maskelyne, in Amerika Shepard.

Anknüpfend an die ältere Zeit fördern die Meteoritenstudien um die Wende des vorigen Jahrhunderts St. Meunier und Lacroix in Paris, Fletcher in London, Brezina ermöglicht die Eisenuntersuchungen von Cohen und Tschermak liefert neue wichtige Beiträge. In Amerika mehren sich die Forscher und Farrington, Merill und Hovey, bearbeiten die Sammlungen in Chicago, Washington und New York. Gleichsam als Jubiläums-Festschriften zur Jahrhundertfeier der emporgeblühten Meteoritenwissenschaft erschienen Cohens „Meteoritenkunde“ und Wülfings „Meteoriten in Sammlungen“. Zwei Werke, die uns die wissenschaftliche Entwickelung der Meteoritenkunde und den gesamten Besitzbestand an Meteoritenmaterial im ersten Jahrhundert der Meteoritenforschung vor Augen stellen.

Mit der Verallgemeinerung des Wissens von den Meteoriten wendet sich ihnen auch das Interesse der Laien zu und es entstehen zahlreiche Privatsammlungen.

Mit der Zunahme des Wettbewerbes zwischen den großen öffentlichen und den vielen neu entstandenen Meteoritensammlungen entwickelt sich ein unerfreulicher börsenmäßiger Meteoritenhandel mit bis dahin nicht vorgekommenen hohen Preisen.

In den Morgentagen des neuen Jahrhunderts gewinnen die Erfolge auf dem Gebiete der Metalllegierungen auch für die Meteoreisen große Bedeutung. Das physikalische Problem der Herstellung der Meteoreisenstrukturen rückt mit dem Studium der Umwandlungsdiagramme der Metalllegierungen in das Reich der Erfüllung (vgl. den Abschnitt 11 „Künstliche Darstellung“).

Mit diesen vielverheißenden Erfolgen darf man getrost von den Forschern des 20. Jahrhunderts die Auflösung aller noch bestehenden Meteoritenrätsel erwarten.

2. Herkunft der Meteoriten. Da das von Donner begleitete Herabstürzen eines Meteoriten aus den heiteren Höhen des Himmels in unserer Athmosphäre vor sich geht, so darf man sich nicht darüber wundern, wenn diese Phänomene anfänglich für irdische Dinge gehalten wurden und selbst verständnisvolle Männer sich hartnäckigst gegen die Frage auflehnten, ob diese in unserem Dunstkreise vor sich gehenden Vorgänge nicht doch ihren Ursprung im Weltenraume haben könnten. Die Astronomien enthielten vor 100 Jahren fast gar nichts über die Feuerkugeln. Auch Bode schreibt in seiner „Anleitung zur Kenntnis des gestirnten Himmels“ (1823) „der sogenannte ziehende Drache, die hüpfende Ziege, Fackeln, brennende Balken und andere leuchtende Meteore haben vermutlich teils mit den fallenden Steinen einerlei Art und Beschaffenheit und sind von denselben nur in der Größe und Figur unterschieden, teils können dieselben auch aus zähen und groben Dünsten der unteren Luft entstehen, die durch eine Gärung ihrer Urstoffe ein phosphorisches Licht von sich geben und vom Wind in allerhand zufällige Gestalten und Bewegungen fortgeführt werden.“ Weil aber die Geschwindigkeit einer Feuerkugel größer ist als die einer Kanonenkugel, wurde die Vorstellung, die Meteoriten von den Dünsten unserer Atmosphäre herzuleiten, bald aufgegeben. Chladni, der vom Herabfallen der Steine überzeugt war und später v. Hoff (1835) sahen in den Meteoriten Gebilde, die in Form lockerer, staubartiger oder gasförmiger Zusammenballungen an der Grenze unserer Atmosphäre ankommen, hier durch deren Widerstand ihre kosmische Geschwindigkeit verlieren und schließlich durch die stattfindende Explosion zu einem festen Körper zusammengepreßt werden.

Viel mehr Anhänger als die vorstehende Hypothese fand schon von 1800 an die Anschauung, nach der die Meteoriten Auswürflinge der Mondvulkane seien. Man war schon durch teleskopische Untersuchungen über die Oberfläche des Mondes orientiert „auf der es aneinander hängende Berge, große und sich weit erstreckende Bergketten, Einsenkungen, Krater und Ebenen gab“. Mit der Entdeckung der vulkanischen Kräfte auf dem Monde begann man diese rätselhaften Steine des Himmels als Auswürflinge der Mondvulkane aufzufassen. Olbers hat diese Hypothese zuerst ausgesprochen (1795, Ueber den Steinregen von Siena), der große la Place äußerte (1802) die gleiche Vermutung, welche Blumenbach sehr beifällig aufnahm und sie „die plausibelste Meinung über diese Dinge“ nannte. In höchst anschaulicher Weise versucht v. Ende in seiner Arbeit „Ueber Massen und Steine, die aus dem Monde auf die Erde gefallen sind“ (1804) Chladnis Hypothese zu entkräften und die Verbindung der Erde mit unserem Trabanten darzutun oder doch auf jeden Fall höchst wahrscheinlich zu machen. Der gleichen Ansicht waren auch Arago, Berzelius, Smith und andere. Als man zur Ueberzeugung gelangte, daß ein Mondvulkan nicht die genügende Kraft besitze einem ausgeschleuderten Meteoriten die richtige Anfangsgeschwindigkeit zu verleihen um auf unsere Erde zu gelangen, verblaßte das Ansehen auch dieser Hypothese der Mondsteine, die aber bis auf den heutigen Tag noch An-

hänger besitzt, deren einer noch vor kurzer Zeit die heimatlosen Glasmeteoriten vom Monde abstammen läßt. Aus den Untersuchungen ob die Meteoriten aus dem Weltraum stammen oder vielleicht einst der Erde angehört haben, gewann Lagrange die Meinung, daß dies der Fall sei und noch neuerer Zeit ist Tissérand für diese Ansicht eingetreten. Danach sollen sie in den grauesten Urzeiten der Erdgeschichte mit so großer Kraft aus dem Innern unseres Planeten gestoßen worden sein, daß sie dem Bereiche der Anziehungskraft der Erde entzogen wurden, um nun einen Ring um die Erdbahn zu bilden, ähnlich dem Ringe des Saturn, aus dem Teile wieder zur Erde fallen.

Neuerer Zeit gewann die Anschauung besonders unter den Astronomen bis auf den heutigen Tag die meisten Anhänger, welche die Meteoriten mit den Sternschnuppen und Kometen in Verbindung bringt. Für den Zusammenhang zwischen diesen Erscheinungen brachte Schiaparelli wichtige Gründe bei. Mit einigen Abänderungen anerkannte auch der Wiener Astronom Weiss die Lehre Schiaparellis und hielt den Zusammenhang zwischen Sternschnuppen, Meteoriten und Kometen für die beste Erklärung der Erscheinungen. Mit einiger Bestimmtheit glaubte man annehmen zu dürfen, daß die Sternschnuppen ebenso feste Körper sind wie die Meteoriten, die mit kosmischer Geschwindigkeit in die Erdatmosphäre eindringen, in der erhitzten Luft glühend werden und hier zu leuchten beginnen und nach Zerstäubung oder Aufzehrung erlöschen oder die Atmosphäre verlassen. Nachdem man herausgebracht hatte, daß Sternschnuppenschwärme seit dritthalb tausenden von Jahren regelmäßig wiederkehren und von einem bestimmten Radiationspunkt am Himmel ausgehen, so hielt man es für die einzige Möglichkeit, daß die um die Sonne kreisenden Meteorschwärme die Erdbahn in einem Punkte schneiden, bei welcher Nähe zufolge der Erdschwere ein Teil der kleinen meteorischen Körper auf unseren Planeten niederfällt. Aus der Umlaufzeit, Richtung und anderen Kombinationen lernte man die Bahn der Meteore berechnen und es wurde gefunden, daß die Bahnkurven der Meteore mit solchen der periodischen Kometen sehr nahe verwandt sind, zum Beispiel die Leoniden mit dem ersten Kometen des Jahres 1866, und der Schwarm vom 27. bis 29. November mit dem Bielaschen Kometen. Die Uebereinstimmung ist so weitgehend genau, daß eine ganze Reihe von Meteorströmen mit vieler Wahrscheinlichkeit sich auf Bahnen bekannter Kometen zurückführen lassen. Daß Kometen durch die Einwirkung der Sonne oder eines Planeten sich teilen (Biela teilte sich in zwei Teile) oder ganz zerfallen und die Bruchstücke sich längs der Bahn der Kometen verteilen und einen Meteorring bilden, aus dem die Sternschnuppenschwärme herrühren, alle diese Abhängigkeiten der Erscheinungen zueinander wirken sehr überzeugend dahin, die niederfallenden Meteoriten mit den Sternschnuppen zu identifizieren und sie somit für Bruchstücke von Kometen zu halten. Ein Unterschied zwischen Sternschnuppen und Meteoriten bleibt nur insoweit bestehen, als die Schnuppen lautlos am Himmel hinziehen und verschwinden, während die Feuerkugeln ihre Geschosse, die Meteoriten, unter donnerndem Getöse auf die Erde schleudern. Beide Erscheinungen werden als die Enden einer langen Reihe gleichartiger Vorgänge mit vermittelnden Uebergängen aufgefaßt. Nach allen diesen Erwägungen war es nur zu erwarten, daß zu Zeiten der Sternschnuppenhäufungen der Leoniden- und Perseidenschwärme auch eine Steigerung der Meteoritenfälle eintrete. Unter den ca. 350 bekannten Meteoritenfällen sind nun zwar einige zur Zeit von Sternschnuppenfällen gefallen. So soll das Eisen v. Mazapil dem Meteorschauer vom 27. November 1885 entstammen und ein Fragment des Kometen Biela sein. Aber die Zeittafel der Meteoritenfälle gibt den Nachweis, daß die große Mehrzahl der Meteoriten nicht zur Zeit von Sternschnuppenschwärmen auf die Erdoberfläche gelangt sind.

Der kurz erörterten Lehre, nach der die Meteoriten einen Teil des Sternschnuppenphänomens darstellen, ist in den siebziger Jahren des vorigen Jahrhunderts eine Hypothese entgegengestellt worden, die ihren Ausgang nicht von astronomischen Erwägungen genommen hat.

Sie fußt auf mineralogisch-geologischer Grundlage, dem Studium des vorhandenen Meteoritenmaterials und der Vergleichung der Ankunftszeiten gleichartig zusammengesetzter Meteoriten. Diese neueste von sicheren realen Beobachtungen ausgehende vulkanische Meteoritenhypothese wurde 1875 von G. Tschermak der Wiener Akademie der Wissenschaften eingereicht und später durch Nachträge erweitert und befestigt. Wenn Brewster, L. Smith, Haidinger, Daubrée die Entstehung der Meteoriten durch Auflösung eines Himmelskörpers ausgesprochen haben, so wird die Zerteilung kleiner Himmelskörper von Tschermak zum ersten Male einem vulkanischen Vorgange zugeschrieben. Aus den Formen der Meteoriten ist zu schließen, daß sie echte Trümmer oder Bruchstücke sind, die von größeren planetarischen Massen abstammen können. Nicht nur ihre Formen, auch vorkommende Rutschflächen an den Meteoriten bedeuten Verschiebungen in der Masse und

viele gleichen vulkanischen Tuffen, was schon Haidinger hervorgehoben hat. Wo Daubreé es unentschieden läßt, ob die Zertrümmerung eines Weltkörpers durch Zusammenstoß oder Explosion erfolgt sei, versucht es Tschermak seine Entscheidung für die explosive Zerstäubung mit dem Gefüge der Meteoriten zu begründen, die so gebaut sind wie irdische Gesteine, die explosiven Kratern entstammen, ähnlich den Maaren der Eifel, durch vulkanische Explosionen ohne Lavaerguß. Eine explosive Tätigkeit, worauf die Meteoriten hinweisen, können nur plötzliche Ausdehnungen von Gasen und Dämpfen bewirken, unter denen Wasserstoff in erster Reihe beteiligt gewesen sein mag. Der Vulkanismus als kosmische Erscheinung, wie uns ihn die Materie der Meteoriten im Einklange mit der gleichartigen Entwickelung der Gestirne lehrt, die alle eine vulkanische Phase durchmachen, ist der Zerstörer planetarischer Massen. Die Bruchstücke werden nach ihrer Lostrennung in Schwärme von Bruchstücken gleichartiger Beschaffenheit angeordnet, die in gesetzmäßigen Bahnen die Erdbahn kreuzen. Die überzeugendsten Beispiele für die Existenz von Meteoritenströmen liefert die Gruppe der Eukrite. Wenn man ihre Bahnen und die Knotenpunkte ermittelt, die sie mit der Erdbahn bilden, so findet man, daß sich der Tag des Eintreffens mit der Zeit verschiebt, was soviel bedeutet, daß ihre Knotenpunkte mit der Erdbahn vorrücken. Aus der Berechnung der Knotenpunkte konnte von Tschermak schon vor Jahren das nächste Niederfallen eines Eukriten gegen Ende Oktober voraussagen, welche Vorausberechnung durch den Niederfall des Eukriten von Peramiho am 24. Oktober 1899 tatsächlich bestätigt wurde.

Für die vier unzweifelhaft gleichartigen Eukrite von Stannern, Jonzac, Juvenas, Peramiho wurde die Verschiebung des Knotens der Zeit proportional gefunden. Für die Knotenlänge E erhält man die Formel $E = 230{,}64 + 1{,}6175\,t$, in welcher t die Jahreszahl minus 1800 bedeutet. Die größte Differenz wurde nicht mehr als $1\frac{1}{2}$ Tage gefunden. Aus dieser bestimmten Wiederkehr und der regelmäßigen Folge der Knotenpunkte, die jährlich einer Verschiebung von $1^{\circ}\ 36'$ entspricht, ist für die astronomische Zusammengehörigkeit der Eukrite eine sehr große Wahrscheinlichkeit vorhanden. Obwohl v. Niessl die astronomischen Bahnen dieser Eukrite nicht übereinstimmend gefunden hat, was besagt, daß sie nicht auf denselben Ursprungsort hinweisen, so kann man die Möglichkeit immerhin offen lassen, daß Stannern, Jonzac und Juvenas aus derselben Gegend des Weltraumes herrühren, wenn man berücksichtigt, daß die Angaben der Augenzeugen über die Bahn von Feuerkugeln wegen der Plötzlichkeit des Auftretens großen Irrungen unterworfen sind. Nach v. Niessl bewegen sich die Meteoritenfälle, sowie die Sternschnuppen auf hyperbolischen Bahnen, was aber nicht ausschließt, daß bei ungenauer Kenntnis der Bahngeschwindigkeit Meteoriten auftreten, die sich ähnlich den Planeten in elliptischen Bahnen bewegen.

Dieser aus unbestreitbaren Tatsachen abgeleiteten Meteoritenhypothese erwächst auch aus astronomischen Erwägungen eine feste Stütze. Neuere Beobachtungen haben nämlich ergeben, daß zwischen dem Meteoriten- und Sternschnuppenmaterial eine Verschiedenheit besteht. Ordnet man die Meteoriten nach dem spezifischen Gewichte an, so erhält man eine Reihe, die mit den kohligen Meteoriten von der Dichte 1,7 bis 2,9 beginnt, es folgen die feldspatführenden mit der Dichte 3 bis 3,4, die broncit- und olivinhaltigen Steine (meist Chondrite) mit der Dichte 4,3 bis 7, endlich die Eisen von der Dichte 7,5—7,8. Angesichts der geringeren Dichte, die gegenüber der Erde (5,6) schon beim Monde eintritt (Dichte 3,4) und sich in den äußeren Regionen des Sonnensystems am Planeten Jupiter auf 1,4 und Neptun gar auf eine Dichte von 1,1 erniedrigt, so wird die Vermutung zur großen Wahrscheinlichkeit, daß im Weltraum Partikel in Flocken von lockerer Beschaffenheit verbreitet sind, die aus Stoffen wie Steinpulver, salzartigen Verbindungen, aus Kohle und Kohlenwasserstoffen bestehen, die stromweise in das Sonnensystem eintreten und beim Eintritt in die Erdatmosphäre unter Zurücklassung von Kohlensäure, Wasserdampf und feinem Staub verbrannt werden.

Die hier dargestellte Tschermaksche Hypothese gewinnt noch an Bedeutung, wenn wir die Anschauungen vieler Astronomen von heute kennen lernen, nach denen ein Fertigsein der Himmelskörper ohne Vulkanismus undenkbar ist. Man braucht nur die Zustände auf unserer Erde, dem Mond und der Sonne zu betrachten. Auch auf den Kometen mit elliptischen Bahnen finden sich Erscheinungen, die sich mit vulkanischen Vorgängen verbinden oder vergleichen lassen. Die Kometenschweife hält Hertz für elektrische Wellen, Goldstein für Kathodenbüschel, andere halten sie für Alphastrahlen des Heliums und S. Arrhenius erklärt sie mechanisch durch Strahlungsdruck. Er hält die Kometenpartikelchen für so winzig, daß sie dem Gesetze der Gravitation nicht mehr gehorchen, sondern durch die Lichtstrahlen der Sonne in den Weltenraum hinausgedrückt werden. Der Strahlungsdruck wird ausgelöst durch die von der Sonne ausgehende Repulsivkraft und durch elektrische Entladungen im Kopfe der Kometen, die auf die schweif-

bildende Materie gleichfalls abstoßend wirken. Alle diese Erscheinungen werden geradehin mit den großen Spannungen im Innern der Planeten verglichen, als mit vulkanischen Kräften, welche ja eben auch Tschermak zur explosiven Zertrümmerung kleinerer Weltkörper herangezogen und damit die Entstehung und Herkunft der Meteoriten erklärt hat.

Der Ansicht Daubrée's von der Verwandschaft der Meteoriten mit den Planeten und Tschermaks Ableitung der Meteoriten von kleinen planetarischen Körpern beipflichtend, erinnert E. Sueß an den von Seeliger und Wolf beobachteten Beleuchtungswechsel an Planetoiden. Da die Bahn der letzteren zum Teil außerhalb, zum Teil innerhalb des Mars liegt, wird seine Ansicht bestärkt, daß zwischen Mars und Jupiter eine einheitliche planetarische Masse bestanden hat, die nach dem uns bekannten Meteoritenmaterial aus den im Erdkerne vorhandenen basischen Gesteinen bestanden haben muß. Wir finden hier also Tschermaks Auffassung auf die Auflösung eines bestimmten Planeten angewendet und Sueß sagt „Meteoriten und Planetoiden sind nichts anderes als die vorübergehenden Zeugen einer vorübergegangenen Episode in der Geschichte unseres Planetensystems".

Welch reges Interesse an den zu uns gelangten Gästen unseres Sonnenreiches genommen wird, bezeugen noch andere Arbeiten, die sich mit der Herkunft der Meteoriten beschäftigen. V. Goldschmidt wendet sein Komplikationsgesetz, das er bei den Kristallformen und der musikalischen Harmonie hat nachweisen können, auf die Harmonie im Weltraum an, und verlegt die Bildung der Meteoriten in die Zeit der Ausscheidung des Mondes aus der Erdsphäre, wobei der Mond nicht alle Masse des Gebietes und ebenso die Erde nicht aus ihrem Gebiete aufsaugte. Die Teile dieses Gebietes zwischen Mond und Erde verdichteten sich zu Tropfen, die jetzt wahrscheinlich als Meteoriten ihre Bahn um die Erde durchlaufen und „Kosmolithe" benannt werden. Svante Arrhenius läßt die von den Sonnen durch Strahlungsdruck ausgeworfenen Partikelchen im Raume aufeinander treffen und sich zu Aggregaten von kosmischem Staub oder Meteorsteinen ansammeln und verlegt die Meteoriten in das Reich der Nebelflecke oder Nebelsterne außerhalb unseres Sonnensystems. Die nicht auf andere Weltkörper herabfallenden Steinaggregate bilden eine Art Nebel, der es veranlaßt, daß der größte Teil des Himmels zwischen den Sternen dunkel erscheint.

Wenn wir uns an die von Tschermak aufgestellten Unterschiede zwischen Sternschnuppen und Meteoriten erinnern, so bedeuten die Untersuchungerssultate des amerikanischen Astronomen W. J. Pickering eine teilweise Kräftigung der Tschermakschen Hypothese, indem er gefunden hat, daß die Bahnen von Sternschnuppen und Meteoriten verschiedene Fallkurven haben und die Meteoriten einen Gürtel, ähnlich den Asteroiden, bilden. Den Steinmeteoriten erkennt er ähnliche Bahnen zu wie den Planeten, dagegen werden sie ebenfalls wie von Goldschmidt als Abscheidungsprodukte bei der Mondbildung aufgefaßt, während die mit einer größeren Geschwindigkeit sich bewegenden Meteoreisen mit Kometen in Verbindung gebracht werden.

Lassen wir die während eines Jahrhunderts wechselnden Meinungen über die Herkunft der Meteoriten noch einmal an uns vorüberziehen, so werden wir ihnen unbedenklich das Bürgerrecht in unserem Sonnenreiche zuerkennen, ihren stellaren Ursprung, das Eindringen aus fremden Welten für unwahrscheinlich halten und sie nach ihrem Bestande und ihren Formen als Sprengstücke eines durch vulkanische Vorgänge zerstörten Weltkörpers bewundern.

3. **Fallerscheinungen.** Das Fallen von Sternschnuppen und Feuerkugeln geschieht unter ganz ähnlichen äußeren Begleiterscheinungen. Man hat darum mit einiger Berechtigung geglaubt, daß zwischen beiden Vorgängen nur graduelle Unterschiede bestehen und die hell leuchtenden Feuerkugeln nichts anderes wären, als in die Tiefen unserer Atmosphäre eingedrungene Sternschnuppen, von denen sie sich nur durch ihre Größe und langsamere Bewegung unterscheiden. Das stets unverhoffte Erscheinen einer Feuerkugel wirkt auf den Beobachter immer als eine plötzliche Ueberraschung und darum störend auf die richtige Beurteilung des in wenigen Sekunden sich abspielenden Geschehnisses. Hierauf sind die vielen entstellten Angaben über die vom Anfang bis zum Ende des feurigen Schauspiels sich abspielenden Vorgänge zurückzuführen. Von ungeschulten Beobachtern sind kaum je Wahrnehmungen zu erhalten, die zur Feststellung der Geschwindigkeit und Bahn der betreffenden Meteore notwendig sind. Von den im Entstehen begriffenen Meteorstationen (Kosmos, Stuttgart) wird diesbezüglich ein merklicher Fortschritt im Beobachten von Meteoren zu erwarten sein.

Eine am klaren Abend- oder Nachthimmel auftauchende Feuerkugel sieht man erst auf weite Strecken hin einige Sekunden lang fortziehen, einen leuchtenden Schweif auf ihrer Bahn zurücklassend, entstanden durch Absprühen glühender Teilchen von der durch Reibung in der Luft oberflächlich bis zur Schmelztemperatur erhitzten Meteormasse. Befindet sich der überraschte

Beschauer in größerer Nähe, strahlt sie eine große Helligkeit über die ganze überflogene Gegend aus und mit der Plötzlichkeit des Erscheinens gar oft den erschrockenen Menschen einen ausgebrochenen Brand vortäuschend. Die Größe der Feuerkugel wird außerordentlich verschieden angegeben. Jedoch ist sie meist eine rundliche Masse, die gewöhnlich mit bläulichem, aber auch mit grünlichem Lichte leuchtet. Bei der weitaus häufigsten gegen den Horizont geneigten Bahn scheint es, als käme sie immer langsamer sich bewegend, geradeaus auf den Beschauer zu. Doch noch in bedeutender Höhe sieht man den Feuerball plötzlich stille stehen und im selben Augenblicke die Feuerkugel explosionsartig unter donnerartigem Getöse und öfteren nachfolgenden Schlägen oder Knattern und anderen Geräuschen zerstieben, nach allen Richtungen, jetzt auch rötlich leuchtende, raketenartig sich schlängelnde Feuerkörper und Garben ausstrahlen. Nach wenigen Augenblicken ist das wunderbare himmlische Feuerwerk erloschen und Ruhe und Finsternis eingetreten. Am hellen Tage fallende Meteoriten erscheinen in Gestalt einer kleinen Wolke am Himmel, die dann ebenfalls ihre kosmische Bahn mit der Explosion beschließen. Der explosive Knall entsteht nach Doss und Mach durch die sogenannte Kopfwelle, eine Schallwelle von der Gestalt eines hohlen Kegels, dessen Achse in der Bahn des Meteoriten und ~~an der~~ Spitze der Vorderseite des Meteoriten liegt.

Zur Zeit des Ereignisses eingetretene Wolkenbedeckungen, Regen und andere meteorische Vorgänge haben mit dem Meteoritenphänomen nichts zu tun.

Der Hemmungspunkt ist jener Ort, wo das Meteor zum Stillstand kommt, weil die mitgebrachte lebendige Kraft und planetarische Geschwindigkeit des Meteors aufgezehrt ist. Er liegt in sehr verschiedenen Höhen über der Erdoberfläche und wurde zwischen 3,7 bis 46,7 Kilometer gefunden. Vom Hemmungspunkte ab fallen die Steine nach dem Gesetze der Schwere nieder und kommen je nach der Größe und Zahl mit Sausen und Geraschel auf der Erde an, wo die kleineren Steine auf der Oberfläche liegen bleiben und die größeren je nach der Beschaffenheit des Bodens sich mehrere Meter tief in die Erde graben (Agram 1,4 Meter, Knyhahinya 3,5 Meter tief). Nach dem Niederfall sofort aufgehobene Steine fühlen sich gewöhnlich warm an. Ausnahmsweise wurde einmal an einem Steine eine Temperatur unter 0° beobachtet (Dhurmsala).

Ein großer Steinregen geht gewöhnlich auf eine große elliptisch geformte Streufläche nieder, in der die Steine in der Richtung der größten Achse sich anordnen, wobei die schwersten Steine in der Regel am Ende der Fallfläche liegen. Die Fallfläche von L'Aigle hatte eine Länge von 2,5 Meilen und eine Breite von 1 Meile.

Die Fallerscheinungen treten durchaus nicht bei jedem Meteorfall mit derselben Gemeinsamkeit auf und einzelne Erscheinungen bleiben auch ganz aus und es sind Meteoritenfälle bekannt, die ohne Explosion der Feuerkugel erfolgten. Das Eisen von Avče fiel bei Tage, es kündigte sein Nahen in keiner Weise an und machte sich nur durch Pfeifen und raschelndes Einschlagen in einen Baum einem in nächster Nähe befindlichen Feldarbeiter bemerkbar.

Von Meteoriten sind auch verschiedenartige Unglücksfälle verursacht worden. In China wurden im Jahre 616 zehn Menschen von einem Steinregen getötet, in Sachsen sollen im Jahre 823 fünfunddreißig Ortschaften durch einen Steinregen in Brand gesteckt worden sein, in Mailand erschlug 1600 ein in das Kloster Santa Maria della Pace eindringender Stein einen Franziskanermönch. Aehnlich unglückliche Ereignisse werden noch mehrere überliefert; erst unlängst ist bei einem Steinregen um das Dorf El Nakhla el Baharia östlich von Alexandria in Aegypten am 28. Juni 1911 ein Hund erschlagen worden.

4. **Größe. Zahl. Verteilung.** Die Größe und Masse der bisher niedergefallenen Meteoriten schwankt vom Staubkorne bis zu viele tausende Kilogramm schweren Blöcken. Der größte, unversehrt erhaltene Meteorstein ist der Stein von Knyahinya (9. Juni 1866) im Gewichte von 293 Kilogramm in der Wiener Sammlung. Schwerer waren die Massen von Bjurböle (zirka 400 Kilogramm) und jene von Long Island, die jedoch zertrümmert sind.

Gigantische Massen kennt man von den Eisenmeteoriten, die der Zerberstung größeren Widerstand entgegensetzten als die Steine. Das Gewicht des Eisenkolosses von Ranchito (Bacubirito) schätzt man auf 50,000 Kilogramm, die beiden Schollen von Chupaderos mit unbekannter Fallzeit, die aneinander passen, wiegen 15,000 und 10,000 Kilogramm, das brasilianische Eisen von Bendegó (gefunden 1784) 5300 Kilogramm, Youndegin (gefunden 1884) 909 Kilogramm, in der Wiener Sammlung. Daran schließen sich Eisen im Gewichte von einigen 100 Kilogramm wie die Blöcke von Canon Diablo, Toluca und Mukerop und andere und die Reihe endet in Blöcken mit meist unter 50 Kilogramm und ganz kleinen Stücken von der Größe einer Haselnuß. Die Steinmeteoriten überschreiten selten 50 Kilogramm, was in der häufigen Zersprengung der Steine in der Atmosphäre begründet ist. Meist sind es Stücke mit einigen Kilogramm, in der Mehrzahl aber

nur mehrere 100 Gramm und weniger schwere Steine. Das Durchschnittsgewicht eines Pultusker Steines betrug 67 Gramm. Das Gewicht sinkt herunter bis zu Körnern unter 6 Centigramm und weiter bis zu unwägbaren Stäubchen, die sich als Meteorstaub niedersenken. Von Anbeginn an kleine Meteormassen werden in der Atmosphäre aufgezehrt und erreichen überhaupt die Erde nicht.

Wie das Gewicht ist auch die Zahl der aus einer Feuerkugel fallenden Steine sehr schwankend und reicht von einem Individuum bis zu vielen tausenden von Exemplaren, die dann als ein Steinregen sich über weite Strecken ausbreiten. Da viele Stücke eines Steinregens als ganze Steine auf der Erde ankommen, muß man wohl annehmen, daß sie als geschlossene Schwärme und in parallelen Bahnen die Atmosphäre durchqueren. Zu den großen Steinregen zählt der Fall von Pultusk (30 Januar 1868) mit schätzungsweise 100000 Steinen, der Fall von L'Aigle (26. April 1803) mit zirka 3000 Steinen, ebenso hoch schätzt man die Zahl des Mócser Falles (3. Februar 1882), auf mehrere hundert jenen von Stannern (22. Mai 1808). Von großer Bedeutung für die Auffindung der Steine ist die Beschaffenheit des Terrains. Daran ist es offenbar auch gelegen, daß kleine Steinchen nicht gefunden werden und es ist gewiß nicht dem Zufall zuzuschreiben, wenn man bei dem Fall von Hessle (1. Januar 1869) sehr viele unter 1 Gramm schwere Steinchen fand, weil sie eben auf eine Schneedecke gefallen waren.

Verzeichnet man die Meteoritenfallorte auf einer Weltkarte, so drängen sich die Fallpunkte in Kulturländern enge zusammen und verlieren sich in unbewohnten wüsten Gegenden. Die Meteoriten übernehmen geradezu die Rolle eines Kulturmessers über Länder und die Bildung ihrer Bewohner. Aus der südwestlichen Ecke von Frankreich breitet sich ein breites Meteoritenfeld über Mittel-Europa gegen Rußland ziehend aus, wo sich die Punkte verlieren und in Sibirien und den mittelasiatischen Ländern ganz verschwinden. In der alten Welt ist nur noch Indien mit Fallpunkten stark besetzt. Wo sich junge Kultur entwickelt, wie in Australien, Japan, Südafrika erscheint sofort der Meteorit in ihrem Gefolge.

In der neuen Welt zählt Nordamerika die meisten Meteoritenfälle und zwar im alten Kulturland Mexico und den Vereinigten Staaten und hier sehen wir umgekehrt wie in Europa von Osten gegen Westen in dichten Scharen die Fundpunkte ausstrahlen und allmählich abnehmen. In Südamerika ist es gewiß auch alter Kultureinfluß, daß Chile reich an Meteoriten ist. Scheidet man die Fallorte nach dem Material, ob Eisen oder Stein, so zeigt sich, daß die Eisenfälle in Amerika die Zahl der Steine um das Doppelte überragen, während in Europa und Indien sich zwischen den Steinen nur ganz vereinzelte Eisenfälle finden, während wieder Australien fast nur Eisenfälle ausweist. Diese ungleiche Verteilung des Meteoritenmaterials ist augenscheinlich in den klimatischen Verhältnissen begründet. Eine vom Verfasser in den letzten Jahren vorgenommene Zusammenstellung der Fallorte nach Ländern veranschaulicht folgende Uebersicht.

Afrika.

	Eisen	Steine
Nordafrika	3	3
Ostafrika	—	4
Südafrika	7	5
Westafrika	4	-
Zentralafrika	1	1
im ganzen	15 +	13

= 28 Meteoritenfälle.

Nordamerika.

	Eisen	Steine
Britisch-Amerika	5	3
Vereinigte Staaten	124	53
Mexiko	22	6
Zentralamerika	3	1

Südamerika.

	Eisen	Steine
Argentinien	1	2
Bolivia	2	1
Brasilien	3	5
Chile	18	3
Columbien	2	—
Patagonien	1	—
Peru	1	—
	182 +	74

= 256 Meteoritenfälle.

	~~Eisen~~	~~Steine~~
~~Nord- und Zentralamerika~~	~~151~~	~~66~~
~~Südamerika~~	~~31~~	~~8~~

Asien.

	Eisen	Steine
Arabien	1	—
Hinterindien	—	3
Indien	3	63
Japan	—	6
Java	1	4
Persien	—	1
Philippinen	—	1
Rußland, asiat.	6	7
Kleinasien	—	2
im ganzen	11 +	87

= 98 Meteoritenfälle.

Australien.

	Eisen	Steine
Australien (Neuseeland und Archipel)	19 +	6

= 25 Meteoritenfälle.

Europa.

	Eisen	Steine
Belgien	—	3
Dänemark	—	1
Deutsches Reich	7	22
Frankreich	2	48
Großbritannien	1	11
Holland	—	2
Italien	—	15
Norwegen und Schweden	1	5
Oesterreich-Ungarn	8	24
Portugal und Spanien	2	12
Rußland, europ.	12	45
Schweiz	1	—
Serbien	—	3
Türkei, europ.	—	2
im ganzen	34 +	193

= 227 Meteoritenfälle.

Eine absolute Angabe über die Zahl der jährlich zur Erde fallenden Meteoriten ist nicht zu machen. Nach einer schätzungsweise angestellten Berechnung des Verfassers gehen wahrscheinlich in einem Jahre 950 Meteoritenfälle auf die Erde nieder (Tscherm. min. petr. Mitt. Band 22, 1903).

5. **Gestalt und Oberfläche.** Mit dem Eintritte in die irdische Atmosphäre verfällt der Meteorit oder ein ganzer solcher Schwarm vollständig dem Einfluß irdischer Kräfte. Die planetarische Geschwindigkeit, mit der ein Meteorit an der obersten Grenze der Atmosphäre anlangt, beginnt mit dem Vordringen der Masse in die tieferen Luftschichten eine Hemmung zu erfahren, verursacht durch unsere Lufthülle, die wie ein unüberwindlicher Puffer auf die vordringende Meteormasse wirkt. Hierbei wird eine Menge lebendiger Kraft ~~entwickelt~~, in Wärme umgesetzt und der Meteorit wird zur Feuerkugel. Die auf ihm entwickelte Glühatmosphäre erreicht über 1600° C und beginnt seine Oberfläche abzuschmelzen. Die absprühende Schmelzschicht wird immer wieder erneuert. Ist ein Stein sehr klein, so wird er durch Abschmelzung ganz aufgezehrt. Diesem Abschmelzungsprozesse in der Atmosphäre verdanken die Meteoriten ihre schwarze Schmelzrinde, die sie alle auf die Erde mitbringen und ihnen als ein untrügliches äußeres Erkennungszeichen anhaftet. Der ganze Abschmelzungsvorgang verläuft so rasch, daß die innere Masse des Meteoriten kaum eine Erwärmung erfährt. Außer der Berindung der Meteoriten, die wir auch als Schmelzkruste bezeichnen, erfährt der Meteorit noch eine zweite Veränderung. Der Unterschied der Temperatur zwischen der Oberfläche und dem Innern des Meteoriten, wo er die Kälte des Weltraumes besitzt, entstehen Spannungen in der Masse, die vielfach zur Zersprengung der Meteoriten führen und es kann geschehen, daß ein ursprünglich großes Meteoritenbruchstück in der Atmosphäre ganz zerstückelt wird.

Die Form der Meteorsteine ist eine zufällige. Ihre körperliche Gestaltung kann im Einzelfalle wenig genau umschrieben werden und läßt sich nur durch eine Formenreihe darstellen. An dem einen Ende stehen die echten Polyederformen mit Flächen, die in scharfen Kanten zusammenstoßen, in der Mitte Stücke mit meist konvexen Flächen und stark abgerundeten Kanten und am zweiten Ende gruppieren sich die echten Knollenformen, die fast nur von konvexen Flächen begrenzt sind. Dazwischen liegen die vielen Uebergangsgestalten, deren Ausbildung im Zusammenhange mit der in der Luftbahn früher oder später erfolgten Zersprengung steht. Außer der Gestalt und der Schmelzrinde gehören auch verschieden geformte Gruben und Grübchen zu den häufigen Eigenschaften der Meteoriten, die manchem Meteoriten eine ganz dekorative Oberflächenornamentik verleihen. Daubrée nannte diese Grübchen „Piezoglypten", d. h. „durch Druck ausgebildet", da er die Vorstellung hatte, diese Grübchen seien von den komprimierten Luftgasen der voranfliegenden Brustseite des Meteoriten eingebohrt worden. Nach des Verfassers Ansicht haben wir es jedoch auf der Oberfläche der Meteoriten nur mit Bruchflächen zu tun, aus deren ursprünglicher Beschaffenheit sich die jetzige Oberfläche herausgebildet hat. Er nennt darum die Vertiefungen auf der Meteoritenoberfläche „Rhegmaglypten", das heißt „durch Bruch ausgehöhlt". Die Gruben haben auf den Stein- und auch den Eisenmeteoriten nur ein zeitliches Dasein. Die Abschmelzung arbeitet nämlich auf eine Ausebnung der Oberfläche hin. Steine, die unzerbrochen heruntergelangen, haben tatsächlich gerundete knollige Formen, auf denen die vom Bruch herrührenden Oberflächenfiguren weggeschmolzen sind. In der Atmosphäre zersprengte Steine haben alte gerundete Flächen und eine oder mehrere jüngere unebene und wellige Flächen, die man als Sekundärflächen bezeichnet. Wiederholt sich der Bruch desselben Stückes noch mehrere Male, so erhält der Stein auch Tertiär- und Quartärflächen. Je mehr jüngere Flächen auftreten, um so scharfkantiger und weniger abgeschmolzen erscheint der Meteorstein. In der Luftbahn sehr spät zersprungene Stücke fallen öfter mit frisch oder nur wenig angeschmolzenen Bruchflächen hernieder.

Es kommt vor, daß manche Steine und Eisen ihre im Fluge eingestellte Richtung einhalten und aus diesem Grunde an der voranfliegenden Brustfläche stärker abschmelzen und dann der flüssige Schmelz als schöner Drift nach der Rückenfläche zu

abfließt. Steine mit einem solchen sternförmig ausstrahlenden Drift auf der Brustseite nennt man „orientierte Steine“ oder „orientierte Eisen“, wo die Erscheinung wegen der größeren Beweglichkeit des Schmelzes in noch zarteren und feineren Fäden sich ausspinnt.

Die Gestalt der Meteoreisen ist fast durchweg die Klumpenform, mit einer in der feuchten Erde durch Abwitterung entstandenen Oberfläche. Die echte meteorische Gestalt und Oberfläche ist nur an zehn Meteoreisen vorhanden, von denen sechs in Wien aufbewahrt sind. Da die Eisen Kristallindividuen darstellen, so macht sich diese Gesetzmäßigkeit auch in ihrer Form geltend. Am Eisen von Quesa wurden fünf Flächen beobachtet, von denen vier Trennungsflächen einem Halboktaeder und die fünfte größte Fläche als Gleitfläche einem Ikositetraeder angehören. Die vier Oktaederflächen bilden die bucklige Brustseite und die fünfte Fläche die Rückenseite des Meteoriten. Nach dem Quesatypus gestaltete Eisen sind: Agram, Algoma, Cabin-Creek, Iron Creek, N. Goureyma, Morito und Sarepta.

Bei Zusammenfassung aller äußeren Erscheinungen der Meteoriten findet man ihre ganze Tracht als ein durch Abschmelzung umgemodeltes Relief der ursprünglichen Bruchflächen, entstanden während einer nur wenige Sekunden währenden Feuerattaque, als letzte Episode in der Entwickelungsgeschichte eines Meteoriten.

6. Chemische Zusammensetzung. Seit Uebung der Gewichts- und Spektralanalyse hat man eifrigst danach gesucht, ob denn diese Bruchstücke fremder Weltkörper keine unserem Weltteil fremde Bestandteile enthalten. Die analytischen Resultate haben nun die ganz bedeutungsvolle Tatsache zutage gefördert, daß die Meteoriten nur solche Grundstoffe enthalten, die auch auf der Erde vorkommen. Die Lehre der Spektralanalyse von der Einheit der Materie auf allen Himmelskörpern wird somit von den Meteoriten bestätigt, dem einzigen Material aus dem Weltraume, dessen Zusammensetzung wir wägen und messen können. Es ist ein weiterer glänzender Triumph der Ueberzeugung von der Gleichheit der Weltmaterie, daß das Helium spektralanalytisch auf der Sonne schon lange nachgewiesen war, als man es nach langem Suchen auch auf der Erde gefunden und auch in den Meteoriten entdeckt hat. In den Meteoriten sind bisher durch die Gewichts- und Spektralanalyse, folgende Grundstoffe aufgefunden worden.

Aluminum	Calcium
Antimon	Cer
Argon	Chlor
Arsen	Chrom
Baryum	Didym
Gold	Phosphor
Eisen	Sauerstoff
Helium	Schwefel
Iridium	Selen
Jod	Silicium
Kalium	Stickstoff
Kobalt	Strontium
Kohlenstoff	Thallium
Kupfer	Titan
Lithium	Uran
Magnesium	Vanadium
Mangan	Wasserstoff
Molybdän	Wismut
Natrium	Wolfram
Nickel	Zink
Platin	Zinn
Palladium	Zirkonium.

Von den 44 aufgeführten Elementen erscheinen nur folgende als Grund- oder häufige Bestandteile in den Meteoriten:

Aluminium	Mangan
Calcium	Natrium
Chrom	Nickel
Eisen	Phosphor
Kalium	Sauerstoff
Kobalt	Schwefel
Kohlenstoff	Silicium
Kupfer	Stickstoff
Magnesium	Wasserstoff.

Reiht man die wesentlichen Elemente der Meteoriten und der Erde in der Reihe ihrer Massenverteilung nebeneinander, so ergibt sich folgende Aufstellung:

Meteorische Reihe	Irdische Reihe
1. Eisen	1. Sauerstoff
2. Sauerstoff	2. Silicium
3. Silicium	3. Aluminium
4. Magnesium	4. Eisen
5. Nickel	5. Calcium
6. Schwefel	6. Magnesium
7. Calcium	7. Natrium
8. Aluminium	8. Kalium.

In dieser Massenverteilung der Elemente kommt es zum Ausdruck, daß die Meteoritenmassen aus basischen und die Erdkruste vorwiegend aus sauren Gesteinen besteht.

7. Mineralogische Zusammensetzung. Wenn wir im vorigen Abschnitte gefunden haben, daß sämtliche in den Meteoriten vorhandenen Elemente sich auch auf der Erde finden, so reicht diese Uebereinstimmung zwischen den meteorischen und irdischen Stoffen noch weiter, wenn wir die von diesen Elementen gebildeten Verbindungen oder Minerale der Meteoriten betrachten. Es sind mit wenigen Ausnahmen der Gattung nach dieselben Minerale, wie wir sie als Gesteinsgemengteile auf der Erde antreffen. Nur der Art nach sind sie von diesen etwas verschieden, da ihre Bildungsweise eine andere gewesen ist. Die Minerale der Meteoriten teilen wir in wesentliche und unwesentliche Gemengteile.

Wesentliche Minerale

Nickeleisen
Olivin
rhombische Pyroxene (Enstatit, Bronzit, Hypersten)
monokline Pyroxene (Diopsid, Augit, Augitenstatit)
Plagioklase (Oligoklas, Labradorit, Anorthit)
Maskelynit (umgeschmolzener Labradorit).

Unwesentliche Minerale

Troilit (einfach Schwefeleisen)
Schreibersit (Phosphor-Nickeleisen)
Graphit
Cohenit (Cementit, Kohlenstoffeisen)
Glas
Chromit (Chromeisenstein)
amorphe Kohle
Diamant
Daubréelit (Chromeisensulfid)
Quarz
Tridymit
Lawrencit (Eisenchlorür)
Magnetit
Oldhamit (Schwefelcalcium)
Osbornit (Calciumoxydsulfid)
Apatit
Moissanit (Silicium-Kohlenstoff)
Weinbergerit.

Die wesentlichen Minerale gruppieren sich in den Meteoriten zu zwei habituell verschiedenen Gesteinen, den Meteoreisen und den Meteorsteinen. Die ersteren enthalten als wesentlichen und einzigen Hauptbestandteil Nickeleisen und die Meteorsteine bestehen aus allen übrigen wesentlichen Mineralen, insgesamt Silikaten, in verschiedenartiger Mischung,

Das Nickeleisen erscheint in einer nickelarmen und nikelreichen Legierung. Erstere heißt Kamacit (Balkeneisen) mit zirka 6,5% Nickel und die nickelreiche heißt Tänit (Bandeisen). Nach Smiths thermomagnetischen Versuchen ist der Tänit ein eutektisches Gemenge dünner Blätter von Kamacit und einem nickelreichem Bestandteil mit nicht weniger als 37% Nickel in bestimmten Verhältnissen. Einen Tänit mit 38% Nickel hat L. Fletcher analysiert. Von den akzessorischen Mineralen finden sich nur im Meteoreisen: Schreibersit, Cohenit, Daubréelith und Moissanit. Alle übrigen Akzessorien, ausgenommen Tridymit, Quarz, Apatit, Weinbergerit, Oldhamit sind den Stein- und Eisenmassen gemeinsam. Außerdem ist Nickeleisen ein häufiger Nebengemengteil in vielen Meteorsteinen.

Zwischen beiden Hauptgruppen vermitteln Uebergänge den Zusammenhang. Das Vordrängen und Zurücktreten des einen Hauptbestandteils gegen den anderen oder der Stein- gegen die Eisenmassen oder umgekehrt, verbürgt uns die Abstammung des meteoritischen Gesamtmaterials aus einer architektonisch zusammengehörigen geologischen Masse.

Ein Vergleich des Meteoritenmaterials mit irdischen Gesteinen ist zu allen Zeiten angestellt worden. Heute kennen wir nun Gesteine unserer Erdkruste mit dem gleichen Mineralbestande, wie in den Meteorsteinen. Es sind dies gerade solche Gesteine, welche den tiefsten uns bekannten Zonen der Erdkruste angehören, aus gabbroiden peridotitischen Magmen kristallisiert sind und uns als Basalte, Diabase, Gabbros und Peridotite bekannt sind. Auf diese basische Gesteinsreihe hat schon Daubrée aufmerksam gemacht und aus dieser Uebereinstimmung der beiderlei Gesteine die Meteoriten als Bestandteile einer planetarischen Masse aufgefaßt. Ganz fremdartig erscheint uns nur die massige Entwicklung des Nickeleisens in den Meteoriten. Ein Analogon hat sich auf der Erde dafür noch nicht gefunden. Zwei wichtige Eisenfunde auf der Erde und die Art ihres Vorkommens lassen uns aber vorahnen, daß auch noch größere Eisenfunde gemacht werden können. Das Eisen von Ovifak auf Disco und Eisenknollen am Bühl bei Weimar unweit Kassel, stecken in basischem Gestein, in Basalt, also in olivinhältigem Gesteine, wie es auch mit den Meteoreisen verbunden ist. Wenn wir schon in mäßigen Tiefen gediegen Eisen finden, werden wir mit großer Wahrscheinlichkeit größere Eisenansammlungen in den uns unzugänglichen Tiefen unserer Erde annehmen dürfen. Für die Anwesenheit von schweren Metallen, vorwiegend Eisen, im Kerne unseres Erdkörpers wurde schon frühzeitig das spez. Gewicht (5,6) der Erde als Beweis geführt. Die Meteoreisen als Reste einer planetarischen Masse und die Eisenfunde in irdischem Basalt sind gewiß wichtige Zeugen für die auf anderem Wege gefundene Voraussetzung eines Eisenkernes in unserem Planeten.

Die petrographische Form der Mineralgemenge ist in den beiden nächsten Abschnitten und die Gruppierung der Minerale im Abschnitte „Einteilung" nachzusehen.

8. Gefüge der Steinmeteoriten. Mittels der Erfahrungen an irdischen Gesteinen können wir die mehr oder minder kompakten Massen der Meteorsteine nach ihrer Ausbildungsweise in zwei Gruppen scheiden. Die erste kleinere Gruppe enthält Steine von kristallinisch-körniger oder porphyrartiger Ausbildung und in die andere große Abteilung gehören alle gewöhnlichen Meteorsteine von tuffartigem Ansehen.

Die echt körnige Ausbildung ist in manchen Gliedern gleichmäßig vorhanden, wie in Chassigni und El Nakhla el Baharia, während die kleine Gruppe der Eukrite mit der sogenannten ophitischen Struktur auskristallisiert ist, wie wir sie in gleicher

Weise in irdischen diabasischen und manchen basaltischen Gesteinen mit einer gewissen Regelmäßigkeit antreffen. Die ophitisch struierten Eukrite verraten unter den Meteoriten sowohl nach Zusammensetzung und Struktur die nächste Verwandtschaft zu irdischen Gebilden.

Weit ab von irdischen Gesteinsbildungen entfernen sich die tuffähnlichen Meteorsteine. Diese führen fast durchwegs viele rundliche kristallinische Einschlüsse, die G. Rose Chondren (Kügelchen) nannte und danach diese gewöhnlichste Art der Meteorsteine als Chondrite bezeichnete. Einige andere Steine ohne Chondren sind untrennbar mit dem Begriffe eines tuffigen Gebildes verbunden. Ueber die tuffige Natur der Chondrite sind die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen. Auch die Entstehung der Chondren wird verschieden gedeutet. Tschermak hält sie für erstarrte Tropfen, entstanden durch Eruption flüssiger Schmelze, während mehrere Forscher die Grundmasse der Chondrite samt den Chondren für ein kristallinisches Gebilde halten. Vom Verfasser wurde die Meinung ausgesprochen, daß die Chondrite durch Umschmelzung metamorphosierte meteorische Tuffe sind, wonach dann die Chondren bei rascher Abkühlung an Ort und Stelle auskristallisierten.

9. Gefüge der Eisenmeteoriten. Das Gefüge der Eisenmeteoriten hat in allen Fällen seine Entstehung aus einer nickelhaltigen Eisenschmelze genommen, aus der die verschiedenen Glieder je nach dem Nickelgehalte als einfache oder zusammengesetzte Meteoreisen auskristallisierten. Die beiden Hauptgemengteile, aus deren Mischungsverhältnis sich die Strukturarten der Meteoreisen entwickeln, sind der Kamacit und der Tänit. Nach der Struktur können wir also einfache und zusammengesetzte Meteoreisen unterscheiden.

Das einfache Metoreisen oder der Kamacit (Balkeneisen) als selbständige Masse besteht aus einem einzigen oft riesigen Individuum mit ausgezeichneter Spaltbarkeit nach dem Würfel, die durch den ganzen Eisenklumpen durchgeht. In Wirklichkeit ist der Kamacit aus Zwillingslamellen zusammengesetzt, die nach dem Aetzen als feine Linien nach sechs verschiedenen Richtungen erscheinen (Braunau). Solche Kamacitblöcke kennt man heute auch als Gemenge von Stengeln oder Körnern (Mount Joy).

Zu den zusammengesetzten Meteoreisen gehören die sogenannten oktaedrischen Eisen und jene von kristallinisch körnigem Gefüge. Blöcke von Kamacit machen eine starke Minderheit unter den Eisen aus. In überwiegender Zahl sind die Eisenblöcke Gemenge von Kamacit und Tänit (Bandeisen) in einer Verwachsungsart wie man sie lange Zeit nur für die Meteoreisen als eigentümlich gehalten hat. Der Kamacit ist hier in Gestalt von Lamellen gewachsen, die sich parallel den Flächen eines Oktaeders lagern, und sich zu einem oktaedrisch gefügten Netze verweben. Der Tänit besteht aus dünnen Blechen, die sich dicht an die Kamacitlamellen anlegen und somit auch ein Glied des oktaedrischen Netzes ausmacht. Enthält die Mischung zirka 7% Nickel, so bilden sich vorwiegend dicke Kamacitlamellen, bei Steigerung des Nickelgehaltes auf 8—9% mehrt sich der Tänit und die Kamacitlamellen werden schwächer, gleichzeitig beginnt auch die Ausscheidung des dritten Gliedes dieser oktaedrischen Eisen, nämlich des eutektischen Gemenges von Kamacit und Tänit, das als Plessit (Fülleisen) die Maschen im Kamacitnetze ausfüllt. Bei weiterem Steigen des Nickelgehaltes mehren sich Tänit und Plessit und die Kamacitlamellen schrumpfen zu ganz dünnen Streifen zusammen und erscheinen schließlich als Einsprenglinge in plessitischer Grundmasse. Die Dicke der Lamellen hat Tschermak zur Aufstellung von Unterabteilungen der oktaedrisch gebauten Eisen verwendet.

Den wunderbaren Aufbau derartiger Meteoreisen enthüllt uns eine mit sehr verdünnter Salpertersäure geätzte Fläche, auf der die Querschnitte von den Kamacitlamellen als dickere oder schmälere Streifen oder Balken, die Tänitbelege als feine Linien erscheinen. Da das Kristallnetz nach dem Oktaeder gebaut ist, so erhält man je nach dem die Aetzfläche, zum Beispiel parallel einer Fläche des Oktaeders, des Würfels oder eines Achtundvierzigflächners geführt ist, gleichseitig dreieckige, quadratische oder trapezoedrische Figuren. Die Figuren kommen dadurch zustande, daß das nickelarme Eisen (Kamacit) stärker angeätzt wird, während das nickelreichere Eisen (Tänit) in Leisten stehen bleibt. Nach dem Entdecker derselben nennt man sie die „Widmannstättenschen Figuren". Die Kamacitlamellen befinden sich bei gröberer Ausbildung in Zwillingsverwachsung. Seltener findet man ganze Blöcke als gigantische Wiederholungszwillinge (Mukerop, Laurens Co).

Die zweite Abteilung der zusammengesetzten Eisen bildet die Gruppe der kristallisch-körnigen bis dichten Meteoreisen von sehr wechselndem Nickelgehalte. Unter ihnen befinden sich Eisen, die eine verschleierte oktaedrische Struktur erkennen lassen, dabei aber körnig geworden sind (Hammond). Der Verfasser hält die sekundäre Körnung für eine Umwandlung durch Erhitzung und nannte solche umgewandelte Eisen „Metabolite".

Die fein-kristallinen Eisen haben einen Bruch wie künstlicher Stahl, dem ja die

Meteoreisen als natürlicher Nickelstahl gegenüberstehen. Wir dürfen es nicht als eine Ueberraschung nehmen, wenn die Meteoreisenstruktur für die Stahlbereitung eine praktische Bedeutung gewinnt.

10. Einteilung der Meteoriten. Die erste Einteilung der Meteoriten auf mineralogischer Grundlage wurde von G. Rose (1864) vorgenommen. Meteoriten mit gleicher Kombination der Gemengteile wurden in eine Gruppe zusammengefaßt. Später erweiterte und vervollständigte v. Tschermak die Klassifikation unter Berücksichtigung der neueren petrographischen Ergebnisse. Heute ist das Rose-Tschermaksche System in Oesterreich, Deutschland und Amerika im Gebrauche. Vorgenommene Veränderungen an diesem Systeme betrafen mehr die praktische Seite der Anordnung von Meteoriten in Sammlungen. Im folgenden ist die letzte von v. Tschermak aufgestellte Uebersicht wieder gegeben. In den Gruppen I—IV sind neuerer Zeit verschiedene Glieder der Enstatitaugite nachgewiesen.

I. Feldspatführende Gemenge
- Eukrit (Augit und Anorthit wenig Bronzit)
- Howardit (Augit, Bronzit, Anorthit)

II. Feldspatarme bis feldspatfreie bronzitische Gemenge
- Bustit (Diopsid und Enstatit)
- Chladnit (Enstatit und Bronzit)

III. Olivinhaltige kristallinische Steine
- Angra (Augit und wenig Olivin)
- Novo Urej (Olivin, wenig Augit)
- Amphoterite (Olivin und Bronzit)
- Chassigni (Olivin)

IV. Bronzit- und Olivingemenge mit Kügelchen
- Chondrite (Bronzit und Olivin mit Flittern von Eisen und Magnetkies). Ueber 300 Fälle bekannt.

V. Leichte, durch Kohle und Kohlenwasserstoff gefärbte Steine
- Sie enthalten Chondren, sind aber wegen ihrer physikalischen Beschaffenheit von den Chondriten abzutrennen.

VI. Eisen mit Silikaten gemischt
- Mesosiderit (Olivin, Bronzit, Anorthit mit viel Eisen)
- Pallasit (Olivin in einem Eisennetz)

VII. Meteoreisen
- Hexaedrische Eisen (Kamacit)
- Oktaedrische Eisen (Kamacit, Tänit und Plessit)
- Grobkörnige bis feinkristalline Eisen (nickelarme und nickelreiche Legierungen)

Die Unterteilung in Gruppe VI und VII ist vom Verfasser beigesetzt. Die neuesten metallographischen Untersuchungen des Zustandsdiagramms der Nickellegierungen hat Rinne auf die Meteoreisen übertragen und die Anwendung einer chemisch-physikalischen Klassifikation der Meteoreisen ist in baldiger Aussicht.

11. Künstliche Darstellungen. Die Mineralsynthese hat in Frankreich seit jeher die werktätigsten Vertreter gefunden. Es mußte daher auf die französischen Synthetiker einen starken Anreiz ausüben, neben der Herstellung irdischer Gesteine durch künstliche Nachbildungen von Meteoriten ihre Entstehungsweise zu erforschen. Der große Experimentator Daubrée und Meunier haben in zahlreichen Experimenten versucht vor allem die merkwürdigen Strukturformen der Eisen und Steine zu erhalten, jedoch ohne in dieser Hinsicht zu einwandfreien Resultaten zu gelangen. Bessere Erfolge hatten Fouqué und Michel-Lévy als sie nach Darstellung von Diabasen durch Einschmelzung von Anorthit, Enstatit und monoklinen Pyroxen ein den Eukriten ähnliches Mineralaggregat erhielten. Von deutschen Mineralogen hat Rinne aus Olivinfels oder Olivin und Hyperstenschmelze die durch Verstärken und Schwächen des elektrischen Stromes zum Spratzen gebracht wurde, den Chondren der Meteorsteine ähnliche Olivin und Hyperstenkügelchen und ebenso aus rhombischem Pyroxen mit Hilfe eines Sauerstoffgebläses Kügelchen mit fächerförmigstrahliger Anordnung erhalten. Was aus Mangel an ungenügenden Erfahrungen und Methoden der älteren Generation nicht gelang, ist mit Beginn des 20. Jahrhunderts der Metallographie, der neuen Wissenschaft von den Metallegierungen in glänzender Weise gelungen.

Mit Anstellung theoretischer Erwägungen und neuerer praktischen Erfahrungen ist das Meteoreisenproblem der Lösung zugeführt worden. Zu der künstlichen Darstellung derselben haben während der letzten Jahre H. Moissan, Osmond und G. Cartaud, F. Rinne und H. E. Boeke, G. Fränkel und G. Tammann, W. Guertler, N. F. Belaiew und C. Benedicks theoretische und experimentelle Beiträge geliefert.

Osmond und Arnold hatten schon vor mehreren Jahren von Ferrit gebildete Widmannstättensche Figuren im Eisenstahl erhalten. In bisher nicht erreichter Vollkommenheit erhielt erst N. F. Belaiew im Jahre 1909 die Meteoritenstruktur in einem 0,55% Kohlenstoff enthaltenden Stahl, den er während des Ferritabscheidungsinterwalls sehr langsam abkühlte. Unter Anwendung der Erfahrungen Belaiews und im Anschluß an das von Osmond und Cartaud in Gemeinschaft mit Roozeboom entworfene theoretische Umwandlungsschema des Meteoreisens ist es C. Benedicks gelungen (damals in Upsala 1910) entsprechende Eisennickellegierungen in den Formen und Eigenschaften des hexaedrischen und oktaedrischen Meteoreisens in befriedigender Weise kristallisiert zu erhalten. Nach den ver-

muteten jetzt experimentell gesetzmäßig festgestellten Bedingungen zur Entstehung des Meteoreisens wird es nicht anders zu deuten sein, als die langsame Abkühlung der ungeheueren nur mit großen Gebirgskörpern vergleichbaren Meteoreisenmassen, unter eine mächtige schlechtleitende Schutzhülle zu verlegen. Diese Entstehungsart der Meteoreisen führt aber wieder zu den Vorstellungen zurück, nach denen wir die Meteoriten als Bruchstücke eines planetarischen nach dem Vorbilde unserer Erde gebauten Himmelskörper ansehen.

12. Tektite oder Glasmeteoriten. Als vor hundert und etlichen Jahren in Frankreich der Kampf der Meinungen über den Niederfall von Steinen aus der Luft zwischen den gläubigen Beobachtern und ungläubigen Gelehrten wogte, fiel der Steinregen von L'Aigle (1803) den französischen Gelehrten vor die Füße und damit war der Streit zugunsten der himmlischen Abkunft der Meteoriten beendet. Auch heute wäre ein ähnlicher beweiskräftiger, aber diesmal ein Glasregen sehr erwünscht, der die einwandfreie Entscheidung träfe, ob die Tektite echte Meteoriten sind oder ob man sie unter die Pseudometeoriten verweisen muß.

Der neue Streitfall knüpft sich an die grünen Glaskörper aus Südböhmen und Mähren, welche in der Literatur schon seit 1784 als Pseudochrysolite, Bouteillensteine oder Moldavite bekannt und in Tausenden von Exemplaren in die Mineralsammlungen gelangt sind. In neuerer Zeit fand man ähnliche Gläser auf dem Sunda-Archipel und an vielen meilenweit auseinander gelegenen Gegenden des südaustralischen Kontinents und auf Tasmanien. Die niederländischen und englischen Geologen wie Verbeek, Van Dijk, Streich, Clarke, Walcott und andere, welche die merkwürdigen Funde untersuchten, fanden in der Umgebung der Fundstellen selbst auf die weitesten Entfernungen hin keine vulkanischen Gebiete, aus denen diese eigentümlichen den irdischen Obsidianen ähnlich sehenden Glaskörper hätten abstammen können. Sie erschienen auf ihren diluvialen oder tertiären Lagern als Fremdlinge, und so entstand hie Vorstellung von ihrer kosmischen Herkunft. Verbeek sprach diese Gläser geradezu als Sendlinge des Mondes an.

Um diese Zeit hatte der österreichische Geologe Franz E. Sueß sein Arbeitsfeld im Gebiete der Moldavitfunde. Er folgte hier emsig allen ihren Spuren, doch konnte auch er für die Moldavite keine Beziehungen zu vulkanischen Ausbrüchen auffinden. Sueß wurde von der Vorstellung, daß die Moldavite einem langgezogenen meteoritischen Kettenfalle angehören, lebhaft erfaßt und seiner Entschließung verdanken wir den Versuch, die kosmische Abkunft der Moldavite und der Gläser aller übrigen außereuropäischen Fundorte einer gründlichen Untersuchung und wissenschaftlichen Begründung zu unterwerfen.

Die Farbe der Moldavite wurde durchschnittlich flaschengrün gefunden und merklich dunkler bei allen übrigen Gläsern. Die chemische Zusammensetzung ergab einen sehr hohen Kieselsäuregehalt von 70 bis 88 %, Tonerde 9 bis 12 % und geringe Mengen von Eisenoxydul, Kalk, Magnesia, Kali und Natron. Das spez. Gewicht reicht von 2,00 bis 2,50. Die Härte ist nur wenig unter Quarzhärte. Ihr Schmelzpunkt liegt bei 1400° C. Fluidalstruktur ist an vielen Stücken deutlich wahrzunehmen. Mikroskopisch typische Einschlüsse wurden nicht aufgefunden und machten sich bloß Gasbläschen in allen Typen bemerkbar. Einmal wird eine kleine australische Bombe erwähnt, bestehend aus einem Netzwerk von Glas mit Körnchen von Olivin „sehr ähnlich dem Limburgit von Rosenbusch". Die genannten Eigenschaften unterscheiden die Gläser von allen Kunstgläsern und den echten Meteorsteinen, die ja, wie uns schon bekannt ist, kristallinische, stark basische Gemenge sind, während der chemische Charakter der Gläser den höchsten Säuregehalt irdischer Gesteine erreicht.

Der meteorische Charakter aller dieser sauren Gläser wird hauptsächlich aus den Gestalten und Oberflächenskulpturen der höchst mannigfaltig ausgebildeten Glaskörper abgeleitet. Die Moldavite sind durch die sogenannte „zerhackte" Oberfläche ausgezeichnet, die auf schaligen und plattigen Scherben, zylindrischen Stengeln, brettartig flachen Trümmern, polygonalen Bruchstücken, dann symmetrischen Formen wie Ellipsoide oder birn- bis zapfenförmigen, wie kugligen Stücken gleichmäßig erscheint.

Die Gläser von der Zinninsel Billiton sind vorwiegend kuglich und ellipsoidisch gebildet, mit wurmförmigen Kanälen auf der Oberfläche.

Die australischen Vorkommnisse tragen die fremdartigsten Ausbildungsformen bei relativ glatter Oberfläche. Am häufigsten erscheinen die knopf- und bisquotenartigen und mit gewulsteten Rändern versehenen Stücke. Alle sehen künstlichen Gußformen mit Gußnähten außerordentlich ähnlich.

Die dreierlei Vorkommen, die drei Typen darstellen, werden als Moldavite, Billitonite und Australite unterschieden.

Wie die echten Steinmeteoriten von großen Bruchstücken abgesprengt sind, so sind nach Sueß alle diese Glasstücke Trümmer eines großen Glasblockes, der in der Atmosphäre zersprengt wurde und sämtliche Splitter erhielten ihre Oberflächen-

ausstattung durch Erhitzung in der Atmosphäre wie die echten Meteoriten. Wenn man die Verhältnisse auf den echten Meteoriten mit jenen auf den Tektiten kritisch prüft, so läßt sich eine logische Ableitung für die typische verschiedenen Gestalten der Gläser und eine harmonische Oberflächenausbildung derselben nicht finden, wie dies bei den echten Meteoriten der Fall ist. Nach Ansicht des Verfassers müßte man erwarten, daß die sonst gleichartigen Gläser aller drei Fundgebiete als Sprengstücke gleicher Glasblöcke, die unter gleichen Bedingungen zur Erde fallen, einen gleichen Erhitzungsprozeß durchmachen, untereinander gleichartige Gestalten und die gleichen Oberflächenskulpturen an sich tragen, d. h. man müßte erwarten, daß die Glasmeteoriten sich untereinander so nahe gleichen, wie die Tausende von Exemplaren echter Meteorsteine.

Neuester Zeit wurden ein Glasstück von Kälna in Schweden und ein solches von Halle als Tektite beschrieben. Auch diese Stücke sind ihrer Form nach untereinander und von allen übrigen Typen verschieden. Unlängst hat Weinschenk Gläser aus Böhmen und Mähren, die von basischer Zusammensetzung und stofflich mit Kunstgläsern zu vergleichen sind, als Tektite aufgefaßt und einen basischen Typus der Tektite aufgestellt.

Die wahre Natur der saueren Tektite ist uns noch verborgen. Eine allmählich einsetzende Kritik an der meteorischen Ausbildungsweise der Tektite schiebt die Entscheidung der Zukunft zu.

13. **Wert der Meteoriten.** Eine auf wissenschaftlicher Methode beruhende Berechnung des Tauschwertes von Meteoriten hat E. Wülfing aufgestellt (siehe Meteoriten in Sammlungen). Aus dem Gewicht der Gruppe, zu der der betreffende Meteorit gehört, dem eigenen nachweisbaren Gewicht und der Zahl der Besitzer werden die Tauscheinheiten gewonnen. Das Wülfingsche Tauschsystem wurde von der Praxis leider nicht übernommen. Seit wenigen Jahrzehnten wurde es üblich, als Einheit den Preis eines Grammes zu nehmen und damit das Gewicht des ganzen Meteoriten zu vervielfachen. Dieser Brauch hat den Handel mit Meteoriten vollständig der Spekulation überantwortet, welche die Monopolisierung eines Meteoritenfalles anstrebt. Wird das erreicht, so ist die Hochhaltung des Preises gesichert.

Die Preiseinheit richtet sich nach der Höhe des abgebbaren Gewichtes und der Zahl der Abnehmer, und hat begreiflicherweise einen sehr schwankenden Wert. Das Gramm mancher Meteorsteine kostet 10 Pf. und steigt leicht auf 2 bis 4 Mark, selteneres Material wird auch höher wie 5 Mark bezahlt und bei noch höheren Preisen bezahlt der Liebhaber mehr den Namen des Fallortes, als das Material. Bei Abnahme größerer Gewichte wird die Preiseinheit herabgemindert. Die Preise der Meteoreisen sind etwas niedriger gehalten als jene der Meteorsteine. 1 Mark für ein Gramm ist bei Vorhandensein mehrer Kilo ein mittlerer Preis. Bei größerem Gewichte sinkt das Gramm bis unter 10 Pf.; um bei wenig verfügbarem Material auf 2 bis 3 Mark und in Ausnahmsfällen bis auf 5 Mark zu steigen. Der Ankauf eines größeren ganzen Steines oder eines größeren Eisenblockes unterliegt ganz dem Uebereinkommen. Das Schwanken der Preise illustriert vorzüglich eine Zusammenstellung der höchst und und niedrigst gezahlten Preise von H. A. Ward im „Mineral Collector" September 1904. Broadway Press, 1989 Broadway, New York City.

14. **Meteoritensammlungen.** Gleichzeitig mit dem Entstehen der großen Mineralsammlungen am Ende des achtzehnten Jahrhunderts begann auch die Hinterlegung des kostbaren Meteoritenmaterials in den Sammlungen von Wien, London und Paris.

Durch den frühzeitigen Beginn und die bis auf den heutigen Tag systematisch gepflegten Aufsammlungen der Meteoriten in den genannten drei Kulturzentren sind die Meteoritensammlungen in Wien, London und Paris zu den heute noch größten Meteoritensammlungen angewachsen und ist vornehmlich aus ihrem Bestande der heutige wissenschaftliche Besitz der Meteoritenkunde geschöpft worden.

An Zahl der Fallorte und an hervorragenden Unikas steht die Sammlung im naturhistorischen Hofmuseum in Wien an der Spitze. Sie enthält eine systematische und die einzige ihrer Art bestehende terminologische Sammlung, dann eine unerreichte Sammlung großer Platten und Abteilungen großer Steine und Eisenmonolithe. Gegenwärtig (Oktober 1911) besteht ihr Besitz aus 637 Fallorten, 3,076.207 Kilogramm Meteoreisen, 743.579 Kilogramm Meteorsteinen und 131.656 Kilogramm Pallasite, zusammen ein Meteoritengewicht von 3,951. 442 Kilogramm.

Die Londoner Sammlung im Natural-History Museum zählt (Ende 1908) 580 Fallorte und jene von Paris im Jardin des plantes enthält (Ende 1909) 532 Lokalitäten. Später entstanden die großen Sammlungen in Berlin im Mineralogischen Museum der Universität (enthielt Mitte Juni 1904 470 Fallorte mit einem Gewicht von 254.901 Kilogramm), und in Budapest im Nationalmuseum.

Ansehnliche Aufsammlungen von Meteoriten befinden sich in Prag (Museum des Königreichs Böhmen), an den mineralogi-

schen Instituten der Universität Straßburg (enthielt August 1903 212 Fundorte mit 22.396 Kilogramm), Tübingen (hier von Reichenbachs Sammlung eingestellt), Göttingen, München (Sammlungen des Staates), Dresden (im Zwinger), Hamburg (Mineralogisches Institut), Stockholm, Kopenhagen, ferner in den Sammlungen der Kaiserlichen Akademie und im Berginstitut in St. Petersburg, Moskau (Landwirtschaftliche Akademie), Dorpat (Universität), Belgrad (Universität), dann in Rom (Sapienza) und in Bologna (Universität).

In Amerika sind zu großen Sammlungen angewachsen jene in Washington im United States National Museum, New York im American Museum of Natural History, Chicago im Field Museum. Ansehnliche Sammlungen besitzen die Universitäten Harvard in Cambrigde, New Haven in Connecticut und Cleveland in Ohio.

In Indien in Kalkutta entwickelt sich eine große Sammmlung in der Geological Collection im Indian Museum und stärkere Ansätze sind auch schon in Tokio in Japan und in Kapstadt, Südafrika, vorhanden.

Die Zahl der Privatsammlungen ist stark zurückgegangen. Deren größte, die Ward-Coonley-Sammlung mit 603 Fundorten, ist zum Verkaufe im American Museum in New York ausgestellt. Die Sammlung des Marquis de Mauroy in Wassy, Frankreich, zählt 381 Fundorte.

Außerdem finden sich kleinere typische Sammlungen an den meisten mineralogischen Instituten der Universitäten und Hochschulen und in vielen naturwissenschaftlichen Museen.

Literatur. ***E. F. F. Chladni,*** *Ueber den Ursprung der von Pallas gefundenen und anderer ihr ähnlicher Eisenmassen und über einige damit in Verbindung stehende Naturerscheinungen, Riga 1794, 4⁰, 63 Seiten.* — ***Derselbe,*** *Ueber Meteore und über die mit denselben herabgefallenen Massen. Nebst 10 Steindrucktafeln und deren Erklärung von C. v. Schreibers, Wien 1819, 8⁰, 434 Seiten.* — ***C. v. Schreibers,*** *Beiträge zur Geschichte und Kenntnis meteorischer Stein- und Metallmassen und der Erscheinungen, welche derer Niederfallen zu begleiten pflegen, Wien 1820, Folio, 97 Seiten.* — ***O. Buchner,*** *Die Feuermeteore insbesondere die Meteoriten, historisch und naturwissenschaftlich betrachtet, Gießen 1859, 8⁰, 192 Seiten.* — ***Derselbe,*** *Die Meteoriten in Sammlungen, ihre Geschichte, mineralogische und chemische Beschaffenheit, Leipzig 1863, 8⁰, 202 Seiten.* — ***G. Rose,*** *Beschreibung und Einteilung der Meteoriten, auf Grund der Sammlung im mineralogischen Museum zu Berlin. Aus den Abhandl. d. Akad. Wiss., Berlin 1863, Berlin 1864, 4⁰, 161 Seiten.* — ***St. Meunier,*** *Étude descriptive, théorique et experimentale sur les météorites, Paris 1867, 8⁰, 187 Seiten.* — ***A. Daubrée,*** *Rapport sur les progrès de la Geologie expérimentale, Paris 1867, S. 93 bis 142.* — ***G. Tschermak,*** *Die Bildung der Meteoriten und der Vulkanismus, Sitzb. Akad. Wiss., Wien, Bd. 71, Abt. 2, 1875, 13 Seiten.* — ***Derselbe,*** *Ueber den Vulkanismus als kosmische Erscheinung, Sitzb, Akad. Wiss., Wien, Bd. 75, Abt. 1, 1877, 26 Seiten.* — ***A. Daubrée,*** *Synthetische Studien zur Experimentalgeologie, deutsche Ausgabe v. A. Gurlt, Braunschweig 1880, S. 369 bis 567.* — ***S. Newcomb,*** *Populäre Astronomie, Deutsch von E. Engelmann, 8⁰, 5. Auflage (Meteore, Sternschnuppen und Kometen), Leipzig 1881.* — ***G. Tschermak,*** *Die mikroskopische Beschaffenheit der Meteoriten, erläutert durch photographische Abbildungen, 3 Lieferungen, Stuttgart 1883, 1884, 1885, 4⁰.* — ***St. Meunier,*** *Météorites. Abgedruckt in Encyclopédie chimique. Tome II, Appendice, 2me Cahier, Paris 1884, 532 Seiten.* — ***M. E. Wadsworth,*** *Lithological Studies. With eight Plates. Abgedruckt in Memoirs of the Museum of comparative Zoology, Bd. 11, Teil 1, 1884, 4⁰, 208 Seiten, I—XXXIII. (Enthält Vergleiche zwischen den Meteoriten und irdischen Felsarten).* — ***A. Brezina und E. Cohen,*** *Die Struktur und Zusammensetzung der Meteoreien, erläut. d. photogr. Abbild. geätzter Schnittflächen. Lfg. I bis V. Stuttgart 1886, 1887, 1906, 40 Taf. (unvollendet).* — ***E. Cohen,*** *Meteoritenkunde, Heft 1, Untersuchungsmethoden und Charakteristik der Gemengteile, Heft 2, Strukturformen, Versuche künstlicher Nachbildung von Meteoriten, Rinde und schwarze Adern, Relief der Oberfläche, Gestalt, Zahl und Größe der Meteorite, Nachträge zu Heft 1 u. Heft 3, Klassifikation und Nomenklatur. Körnige bis dichte Eisen, Hexaedrite, Oktaedrite mit feinsten und feinen Lamellen, Stuttgart, 1894, 1903, 1905, 8⁰, 340 u. 302 u. 419 Seiten (unvollendet).* — ***E. A. Wülfing,*** *Die Meteoriten in Sammlungen und ihre Literatur nebst einem Versuch den Tauschwert der Meteoriten zu bestimmen, Tübingen 1897, 8⁰, 460 Seiten.* — ***A. G. Högbom,*** *Eine meteorstatistische Studie, Bull. Geol. Inst. Upsala, Bd. 5, 1, 1900, S. 132 bis 143* — ***F. A. Suess,*** *Die Herkunft der Moldavite und verwandter Gläser, Wien, 1900, 8⁰, 189 Seiten. Abgedruckt in Jahrb. d. Geol. Reichsanstalt, Wien 1900, Bd. 50, S. 193 bis 381.* — ***F. Berwerth,*** *Ueber die Struktur der chondritischen Meteorsteine, Zentralbl. f. Min., 1901, S. 641 bis 647.* — ***F. Rinne,*** *Physikalisch-chemische Bemerkungen über technisches und meteorisches Eisen, Neues Jahrb. f. Min., 1905, Bd. 1, S. 122 bis 158.* — ***F. Berwerth,*** *Etwas über die Gestalt und Oberfläche der Meteoriten, Festschrift d. naturw. Ver. a. d. Universität Wien, 1907, S. 29 bis 40.* — ***G. v. Tschermak,*** *Ueber das Eintreffen gleichartiger Meteoriten, Sitzb. Akad. Wiss., Wien, Bd. 116, Abt. 2a, 1907, S. 1407 bis 1441.* — ***E. Suess,*** *Ueber Einzelheiten in der Beschaffenheit einiger Himmelskörper, Sitzb. Akad. Wiss. Wien, Bd. 116, Abt. 1, 1907, 7 Seiten.* — ***W. Fränkel und G. Tamman,*** *Ueber meteorische Eisen, Zeitschr. f. anorg. Chem., Bd. 60, S. 416 bis 435.* — ***W. A. Wahl,*** *Beiträge zur Chemie der Meteoriten, Zeitschr. f. anorg. Chemie, Bd. 69, 1910, S. 52 bis 96.* — ***M. C. Benedicks,*** *Synthèse du fer météorique, Nova acta reg. societat. scient. Upsalensis (IV), Bd. 2, 1910, mit*

3 Taf., S. 1 bis 26, 4°. — ***F. Berwerth,** Fortschritte in der Meteoritenkunde seit 1900, Fortschr. der Min. Kryst- u. Petrogr., Bd. 1, 1911, S. 257 bis 284 (enthält die sämtliche Literatur von 1900 bis 1911). Ueber den Stand der großen Meteoritensammlungen in Wien, London, Paris, Berlin, Chicago, Washington und New York sind die jeweilig letzten Ausgaben der Meteoritenkatologe einzusehen.*

F. Berwerth.

Meteorwasser.

1. Kreislauf des Wassers. 2. Niederschläge. a) Arten. b) Menge und Verteilung. c) Abhängigkeit von äußeren Faktoren in den peripherischen Gebieten. d) Klimaschwankungen. 3. Verhalten von Niederschlag zu Verdunstung und Ablauf. 4. Chemische Zusammensetzung der Niederschläge. 5. Wirkungen der Niederschläge auf die Erdoberfläche. a) Mechanische Wirkungen. α) Verdichtung des Bodens. β) Abrutschbewegung. γ) Schuttablagerung. δ) Hakenwerfen. ε) Abschwemmung. ζ) Felsenmeere. η) Erdpyramiden. ϑ) Regentropfenspuren. b) Lösende Tätigkeit des Meteorwassers. α) Regenrillen am Steinsalz. β) Salz- und Gipsauslaugung. γ) Kalkauflösung, Schratten, Karren. δ) Regenrillen an massigen Gesteinen. ε) Verwitterungstaschen, Dolinen, Erdfälle. ζ) Höhlenbildung. 6. Neubildungen durch das Meteorwasser. a) Mechanische Neubildungen. b) Chemische Neubildungen. 7. Frostwirkung.

1. Kreislauf des Wassers. Das Wasser befindet sich seit seiner ersten Ansammlung auf der Erdoberfläche unter der Einwirkung der Sonnenwärme in einem ewigen, nie ruhenden Kreislauf.

Goethe hat ihn kurz ausgedrückt in den bekannten, immer wiederholten Worten im Gesange der Geister über den Wassern. — Wo sich auch nur die geringste Feuchtigkeit ansammelt, verdunstet Wasser, am bedeutendsten in den warmen Zonen, vom Meere, von Seen und von der Vegetationsdecke aus. Der aufsteigende Wasserdampf folgt den Windströmungen, er verdichtet sich zu Wolken und zu Niederschlägen. Ein Teil fällt auf die Verdunstungsflächen zurück, ein anderer auf das feste Land und fließt auf ihm dem Meere wieder zu.

Der Kreislauf ist im einzelnen verwickelt durch das Ineinandergreifen mannigfacher Prozesse, von denen hier genannt sein mögen: Chemische Umsetzungen organischer und anorganischer Natur an der Erdoberfläche, Eindringen in die Erde, Vermischen mit aus dem Erdinnern und aus den Gesteinen frei werdendem, „juvenilen“ Wasser, Adsorption an Mineralien und Gesteinen und damit zeitweises Ausscheiden aus dem Kreislaufe, Abkürzen des Kreislaufes durch Niederschläge auf dem Meere oder durch Verdunsten vom festen Lande.

Eine Darstellung des gesamten Kreislaufes des Wassers würde uns ein vielfaches Bild aneinandergelegter Kreise geben, die uns in ihrer Gesamtheit die Rückkehr des Wassers zeigen zu dem Meere. Müssen wir auch annehmen, daß die Menge des im Kreislaufe befindlichen Wassers sich stets verändert, so ist diese Veränderung gering gegenüber der Gesamtmenge des im Kreislaufe befindlichen Wassers. Anders aber wird es, wenn wir den Kreislauf zurückverfolgen. Dann summiert sich das dem Kreislaufe zugeführte, aus der Erdtiefe aufsteigende Wasser.

Die geologische Wirkung des Kreislaufes des Wassers wird dadurch gesteigert, daß an ihm Teile der Atmosphäre, besonders Sauerstoff und Kohlensäure, teilnehmen, daß weiter durch lokale und universelle Bewegungen in der Atmosphäre Veränderungen der Wasserdampfverteilung in der Luft eintreten. Der Kreislauf des Wassers verallgemeinert sich zu einem atmosphärischen Kreislauf, der weitere Verwickelungen zeigt.

Der Kreislauf des Wassers wurde häufig weiter gefaßt, indem man annahm, daß eine Atmosphäre innerhalb der Erdrinde sich in Verbindung mit der Lufthülle befinde, und daß es durch Kondensationen in der Erdrinde auch dort zu Niederschlägen komme. Nachdem schon im Altertum Vitruvius das in der Erde zirkulierende Wasser vom Regenwasser hergeleitet hatte, sprach Vossius (1656) diesen Satz von neuem aus, der dann von Mariotte (1686) besonders begründet wurde, wonach man die herrschende als die Mariottesche Lehre (Versickerungstheorie) bezeichnet. Wie aber schon im Altertum Vitruvius in Seneca einen Gegner fand, so traten noch in der jüngsten Zeit allerdings weniger Geologen wie Wasserbautechniker dafür ein, daß kein Wasser des Erdbodens vom Regenwasser herrühre. Besonders Keferstein, Volger, Fr. König suchten diese Kondensationstheorie zu stützen. Die dritte Theorie der Herkunft des Wassers aus vulkanischen Prozessen (eruptive Theorie; „juvenile“ Quellen nach Sueß) kann nicht beim Meteorwasser besprochen werden.

2. Niederschläge. 2a) Arten. Als Meteorwasser wird hier das Wasser der im Kreislaufe befindlichen, zur Erdoberfläche gelangenden Niederschläge (Regen, Schnee, Hagel, Graupen, Tau, Reif, Rauhreif, Nebel) in ihrer mineralogisch-geologischen Bedeutung betrachtet.

Das bei dem Kreislaufe auf die Meeresoberfläche wieder zurückfallende Meteorwasser hat nur geringe geologische Bedeutung (Reinigung der Atmosphäre von terrestrischem und außerirdischem Staub und dessen Ueberführung in marine Sedimente, Vermehrung der im Meerwasser gelösten Gase vgl. S. 867). Größere geologische Bedeutung haben die auf das feste Land niederfallenden Meteorwasser.

2b) Menge und Verteilung. Die auf die feste Erdoberfläche jährlich gelangende gesamte Niederschlagsmenge ist von Murray zu 122500 cbkm und, auf Grund der Supan-

schen Regenkarten von 1898, von Fritzsche zu rund 111940 cbkm berechnet worden, was gleichmäßig verteilt, einer Niederschlagshöhe von rund 750 mm jährlich entspricht. Der Niederschlag auf dem Meere wird von Meinardus zu 353360 cbkm berechnet, entsprechend 980 mm Wasserhöhe auf 361 Mill. qkm Meeresfläche.

Auf peripherische Gebiete (78% des Festlandes) fallen 101450 cbkm oder 90%, was einer Niederschlagshöhe von rund 870 mm entspricht. Die abflußlosen Gebiete der Erde (22% des Festlandes oder 32 × 10^6 qkm), im wesentlichen gleich den regenarmen, haben nur einen Niederschlag von 328 mm oder 10 490 cbkm. Der hier niederfallende Regen verdunstet wieder. Der Gesamtniederschlag der Erde, einschließlich der Meeresoberfläche, damit die am Kreislauf von der festen und flüssigen Erdoberfläche teilnehmende Wassermenge wurde von Brückner auf 483000 cbkm, von Fritzsche auf 465300 cbkm jährlich berechnet.

Unterschiede allgemeiner und lokaler Natur kommen hinzu. Die Niederschlagsmenge im peripherischen Gebiete des atlantischen Ozeans (40% des gesamten peripherischen Gebietes der Erde) beträgt 50% der auf peripherische Gebiete fallenden Niederschläge.

Die mittlere Niederschlagshöhe mit 750 mm gibt einen Grenzwert für regenreiche gegenüber regenarmen Gebieten. Niederschläge unter dem Mittel zeigen in Australien 81%, Asien 81%, Europa 82%, Nordamerika 71%, dagegen in Afrika nur 48%, Südamerika sogar nur 42% der Landfläche. Nach der geographischen Breite ergibt sich als regenreich das Gebiet zwischen 20° nördlicher und 20° südlicher Breite, sowie zwischen 50° und 60° südlicher Breite.

Die in den Zahlen zum Ausdruck kommende Bilanz des Kreislaufes des Wassers auf der Erde enthält mannigfache Fehlerquellen und gibt nur Näherungswerte.

Die größten Niederschlagsmengen sind zu Cherrapunji in Assam (1250 m hoch) mit 11790 mm jährlich beobachtet, während Bergen an der norwegischen Westküste 1850 mm, Cumberland in England 4000 mm aufweist. Im allgemeinen schmiegt sich die Verteilung der Niederschläge der Luftzirkulation an. Ein Aequatorialgürtel mit starker aufsteigender Bewegung heißer feuchter Luft weist meist über 2000 mm auf. In den Subtropen, in denen die Luft wieder absteigt, sinkt die Niederschlaghöhe unter 250 mm, wobei große Gebiete, wie z. B. die Wüstengebiete, des Niederschlags entbehren. In den mittleren Breiten endlich steigt die Regenhöhe auf 500 bis 1000 mm, während sie nach den Polen wieder auf 250 mm abnimmt.

2c) Abhängigkeit von äußeren Faktoren in den peripherischen Gebieten. Für den Niederschlag kommen in den peripherischen Gebieten mehrfache klimatische Faktoren in Frage, von denen als geologisch wichtigste genannt seien: Verhältnis zu den allgemeinen Windsystemen der Erde, bezw. zur geographischen Breite, Entfernung von der Küste, Höhenlage, Lage der Gebirge zu den Regenwinden, Depressionen, Jahreszeiten, Bewaldung.

Das Verhältnis zu den allgemeinen Windsystemen ergibt sich schon aus der allgemeinen Verteilung der Niederschläge auf der Erde.

Mit der Entfernung von der Küste nimmt die Feuchtigkeit der Luftströmung ab; die Niederschlagsmengen werden höher, wenn die Luft an Gebirgen, namentlich an Hochgebirgen, aufsteigt, und damit Abkühlung und Verdichtung des Wasserdampfes hervorgerufen werden. Die dem Winde ausgesetzten Gebirgsanstiege sind regenreich, dahinter befindliche Niederungen regenarm.

Besondere Bedeutung ist in bezug auf die Niederschlagshöhe dem Walde zugesprochen worden. J. Weber macht, sich vornehmlich auf Ebermayer und Müttrich stützend, ausführliche Angaben über das Verhältnis der Niederschlagshöhen in Waldgebieten zur Umgebung, woraus folgende Werte entnommen sind.

Höhenregionen m	Mittel aus den Beobachtungen an forstlichen meteorologischen Stationen mm	Allgemeines Mittel für gleiche Gebiete nach van Bebber mm	Differenz mm
1— 100	656.6	648.6	+ 8.0
100— 200	665.4	582.5	+ 82.9
300— 400	746.5	696.2	+ 50.3
600— 700	1089.3	915.3	+ 174.0
700— 800	1408.9	981.3	+ 427.6
900—1000	1775.1	963.6	+ 811.5

Tritt im Tiefland keine erhebliche Erhöhung der Regenmenge ein, so zeigt sich bei größeren Höhenlagen eine z. T. ganz erhebliche Vermehrung der Niederschläge unter der Einwirkung des Waldes. Dabei ist die Ursache der Erhöhung im einzelnen nicht aufgeklärt. In manchen Fällen liegt der Grund für die Erhöhung in der Verlangsamung der Luftbewegung in größeren geschlossenen Waldgebieten, der erheblicheren Verdunstung an der durch den Wald vergrößerten Oberfläche und dem erneuten Niederschlag eines Teiles der verdunsteten Massen im Beobachtungsgebiet selbst. Den Schlußfolgerungen Webers wird von Schreiber scharf widersprochen.

Eine Vermehrung der Niederschläge zeigt sich mit der Höhe allein, was z. T. schon aus obigen Zahlen hervorgeht. Landolt fand im Kanton Zürich eine Zunahme der Niederschlagshöhe um za. 250 mm auf je 100 m Erhebung über den Züricher See.

Blanford wies in den Zentralprovinzen Indiens in einem Areal von ungefähr 160000 qkm zur Zeit der Aufforstung von 1875 bis 1885 eine durchschnittliche Zunahme der Niederschläge von 173 mm pro Jahr nach gegenüber den Jahren der Entwaldung 1867—1875. Von anderer Seite wird be-

wiesen, daß trotzdem eine Einwirkung des Waldes auf die Niederschlagshöhe nur untergeordnet oder überhaupt nicht bemerkbar sei.

2d) Klimaschwankungen. Der Niederschlag ist abhängig von den Jahreszeiten und unterliegt mit den Jahren Schwankungen. Auf kürzere Zeiträume hat man periodische Klimaänderungen und damit Niederschlagsänderungen nachgewiesen. Brückner wies aus verschiedenen Erscheinungen eine 35jährige Periode der Klimaschwankungen nach. Größere geologische Bedeutung kann diesen Schwankungen nicht zugesprochen werden, wenn sie auch wirtschaftlich besonders fühlbar sind. Die allgemeinen Klimaschwankungen in den geologischen Perioden haben jedoch große Bedeutung für die Wirkung des Meteorwassers. Vielfache geologische Beobachtungen lehren uns allgemeinere Veränderungen der Klimate auf der Erde und damit auch der diesen Klimaten entsprechenden geologischen Erscheinungen.

3. Verhalten von Niederschlag zu Verdunstung und Ablauf. Von den Niederschlägen soll nach einem, von Delamétherie 1797 zuerst formulierten Fundamentalsatz $^1/_3$ verdunsten, $^1/_3$ oberflächlich abfließen und $^1/_3$ in den Boden eindringen. Der sehr oft angeführte Satz ist nur für Ausnahmefälle richtig. Berechnungen über das Verhältnis der Verdunstung zum Abflusse sind oft angestellt worden. So gibt Fritzsche folgende Zusammenstellung:

	cbkm[1])	cm[2])	%
A. Erde (510000000 qkm)			
Verdunstung vom Meer	384 000	75	82
Verdunstung vom Land	81 300	16	18
Gesamter Regenfall der Erde	465 300	91	100
B. Weltmeer (361000000 qkm)			
Verdunstung vom Meer	384 000	106	100
Auf das Land übertretender Wasserdampf	30 640	8	8
Regenfall auf dem Weltmeer	353 360	98	92
C. Peripherische Landflächen (117000000 qkm)			
Wasserdampfzufuhr vom Meer	30 640	26	43
Verdunstung vom peripherischen Land	70 810	61	100
Regenfall auf peripherischem Land	101 450	87	143
D. Abflußlose Gebiete (32000000 qkm)			
Verdunstung vom abflußlosen Gebiet	10 490	33	100
Regenfall auf abflußlosem Gebiet	10 490	33	100

[1]) Im Ganzen.

[2]) Die Wassermasse als gleichmäßige Schicht auf die vorher angegebene Fläche ausgebreitet.

Die Beziehung der Verdunstung zu den klimatischen Verhältnissen kommt in diesen Zahlen schon zum Ausdruck. Klarer wird dies noch, wenn wir der von Penck gegebenen Einteilung der Landoberfläche in drei verschiedene klimatische Hauptprovinzen oder Klimareiche folgen. Wir setzen damit die Beschaffenheit der Landoberfläche in direkte Beziehung zu dem Schicksale des Niederschlags. Die Gebiete sind:

I. Das humide Klima, in welchem mehr Niederschlag (N) fällt, als durch die Verdunstung (V) entfernt werden kann, so daß ein Ueberschuß in Form von Flüssen (F) abfließt ($N - V = F > 0$).

II. Das nivale Klima, in dem mehr schneeiger Niederschlag (S) fällt, als die Ablation (A) an Ort und Stelle entfernen kann, so daß eine Abfuhr durch Gletscher erfolgen muß ($S - A = G > 0$).

III. Das aride Klima, in dem die Verdunstung allen gefallenen Niederschlag aufzehrt, und noch mehr aufzehren könnte, also auch einströmendes Flußwasser zu entfernen vermag ($N - V < 0$).

Bedeutung haben noch die Schneegrenze ($S = A$) und die Trockengrenze der Erde ($N = V$) an der Grenze des humiden zum ariden Gebiete. Die Grenzen sämtlicher Provinzen sind nicht scharf und wandern zeitlich, was wiederum in Uebereinstimmung mit den Klimaschwankungen steht.

Das humide Gebiet enthält eine polare Klimaprovinz, in der die Niederschläge nicht in den Boden eindringen, und phreatische Klimaprovinzen, in denen die Niederschläge mehr oder weniger in den Boden eindringen. Die jahreszeitliche Verteilung der Niederschläge bedingt Unterschiede, indem in der semihumiden Provinz trockene und nasse Jahreszeiten, Wechsel in bezug auf die Menge des einsickernden Wassers eintreten (tropische Provinz mit Regenzeit beim höchsten Sonnenstande; subtropische Provinz mit Regenfall beim tiefsten Sonnenstande). Gegen die polare Provinz oder das nivale Reich hin zeigt sich besonderes Gepräge in der subnivalen Klimaprovinz durch die regelmäßig sich entwickelnde Schneedecke, die den Niederschlag zeitweilig vom Einsickern abhält, dann aber bei der Schneeschmelze in großem Maße an den Untergrund abgibt und andererseits den Abfluß vergrößert. Eine vollhumide Klimaprovinz mit gleichmäßiger Niederschlagsverteilung zerfällt hauptsächlich nach den Temperaturunterschieden in eine äquatoriale und eine temperierte. Das aride Reich unterscheidet sich in eine semiaride Klimaprovinz, in der ein Teil der Niederschläge in den Boden eindringt, aber wieder aufsteigt und verdunstet, und eine vollaride Klimaprovinz, in der die ab- und aufsteigende Wasserbewegung im Boden fortfällt. Das nivale Reich ist geteilt in eine seminivale Provinz, in der der Schneefall durch Regen unterbrochen wird, und eine vollnivale Provinz, in der nur Schnee zum Niederschlag kommt.

Die Bewegung des Niederschlagswassers

in diesen verschiedenen Provinzen ist von hoher geologischer Bedeutung vor allem für die Verwitterung und für die morphologische Ausbildung der Oberfläche. Die neuere Forschung in der Bodenkunde nimmt auf die klimatischen Einflüsse Rücksicht. Eine Einteilung nach klimatischen Bodenzonen ist bereits versucht worden:

(Ramann, Bodenkunde 3. Aufl. 1911 S. 521; Comptes rendus de la conférence internationale agrogéologique I. Budapest 1909, II. Stockholm 1910, Résumé des conférences.)

Die Penckschen Klimaprovinzen geben einen Ueberblick über das regionale Verhalten der Niederschläge. Im einzelnen sind aber für das Verhältnis des in die Erde eindringenden Wassers zum Abfluß und zur Verdunstung noch vielfache Nebenumstände maßgebend, so die Vegetation, speziell die Bewaldung des Gebietes, seine Höhenlage (absolut über dem Meere und relativ über den umgebenden Niederungen) die Durchlässigkeit des Untergrundes, der Grad der Verwitterung der oberflächlichen Schichten und, namentlich in den Kulturländern, der Einfluß des Menschen.

In bezug auf die Bewaldung sind die Angaben über das Verhältnis der Verdunstung zu den gesamten Niederschlägen sicherer wie die Angaben über die Zunahme der Niederschläge durch die Bewaldung. J. Weber stellt folgende Angaben zusammen:

	Von den gesamten Niederschlägen sind zu Boden gelangt	auf den Bäumen verdunstet
Preußisches Beobachtungsnetz:	%	%
in Buchenbeständen . . .	76	24
in Fichtenbeständen . . .	78	22
in Kiefernbeständen . . .	73	27
Bayerisches Beobachtungsnetz (nach Ebermayer):		
in Buchenbeständen . . .	78	22
in Fichtenbeständen . . .	73	27
in einem Kiefernbestande.	66	34

Bühler wies auch den Einfluß des Alters der Bestände nach, wonach in Buchenbeständen von 20-, 50-, 60- und 90-jährigem Alter jeweils 98, 73, 77 und 83% bei dichtem Kronenschlusse zu Boden gelangten. Immerhin empfängt der Waldboden nur ca. $^3/_4$ der Niederschläge, die immergrünen Nadelhölzer halten mehr Niederschläge ab, als die winterkahlen Laubhölzer, dicht geschlossene Bestände mehr als gelichtete, Kiefern mehr als Fichten von gleichem Alter.

Der Wald wirkt weiter konservierend auf das zu Boden gelangte Wasser. Die direkte Sonnenbestrahlung und die Ausstrahlung werden durch ein dichtes Laubdach verhindert. Gegenüber der = 100 gesetzten Einheit der Verdunstungsgröße im Freien werden nach Müttrich in geschlossenem Walde

	verdunsten	dem Boden erhalten bleiben
	%	%
in Buchenbeständen	40.4	59.6
in Fichtenbeständen	45.3	54.7
in Kiefernbeständen	41.8	58.2
in einer Kulturfläche. . . .	90.3	9.7

J. Weber hat „eine Bilanz der Niederschlagshöhe mit der Verdunstungshöhe“ gezogen, aus denen folgende Angaben besonders interessieren:

Mittel für die Region (absolute Höhe)	Der Ueberschuß der Niederschläge über die Verdunstung beträgt in mm Höhe im Freien	im Walde	Von der Niederschlagsmenge verdunsteten prozentisch im Freien	im Walde
m	mm	mm	%	%
0—100	305.3	313.1	55	37
100—200	322.4	351.6	53	30
300—400	309.9	448.3	58	25
600—700	938.7	782.2	22	13

Die in diesen und anderen Berechnungen zum Ausdrucke kommende günstige Wirkung des Waldes für die Erhaltung der Niederschläge entspricht nicht ganz den natürlichen Verhältnissen. Der Lebensprozeß der Pflanzen und die Verdunstung an der großen Oberfläche der Zweige, Nadeln, Blätter usw. kann ziffermäßig nicht erfaßt werden.

Die hier gegebenen Ziffern beziehen sich im wesentlichen nur auf mitteleuropäische Verhältnisse, allerdings mit wechselnden Klimaten.

Für die Menge des in den Boden eindringenden Wassers kommen noch in Frage das Vorhandensein oder Fehlen einer Streudecke, reichlicherer Moospolster, die unter Umständen wie ein Schwamm aufsaugend auf die Luftfeuchtigkeit einwirken. Die Menge des eindringenden Wassers hängt auch von der Durchlässigkeit der Gesteine ab. Ein schwer durchlässiges oder ein tonig verwittertes Gestein kann immer nur eine bestimmte Wassermasse aufnehmen, hindurchleiten und an den Untergrund abgeben. Alles überschüssige Wasser muß, im Walde wie im Freien, oberflächlich stagnieren, allmählich verdunsten, oder, je nach der Neigung, oberflächlich abfließen.

Die Wirkung der Höhenlage auf die Menge des oberflächlich abfließenden Wassers ergibt sich im Freien direkt aus den Neigungsverhältnissen und der Beschaffenheit der obersten Bodenschicht. Ist diese schwer durchlässig, sind alle Poren verstopft, so kann alles Wasser zum oberflächlichen Abflusse gelangen. Leicht durchlässige klüf-

tige Gesteine können unter Umständen alles Wasser aufnehmen. Die große Durchlässigkeit mancher Gesteine kann in Waldgebieten durch den Reichtum des Bodens an Humusstoffen, vielleicht auch durch anorganische Kolloide aufgehoben oder wenigstens vermindert werden, so daß auch in stark klüftigem Gestein eine gleichmäßigere Abgabe des Wassers an den Untergrund erfolgt.

Die ariden Klimaprovinzen zeigen andere Verhältnisse. Stärkere Niederschläge bewirken in den semiariden Provinzen eine tiefere, oft nur kurze Durchfeuchtung. Wälder üben, wie namentlich Untersuchungen von Ototzky, Blisnin, Ismailsky zeigen, in diesen Gebieten eine direkt austrocknende Wirkung (gegenüber dem freien Lande) aus infolge der stärkeren Verdunstung an der größeren Oberfläche.

In der äquatorialen Klimaprovinz zeigt der tropische Regenwald eine vollständige Ausfüllung durch die Vegetation. Die mechanische Wirkung des Regens wird aufgehoben. Der Boden wird vor Verdichtung bewahrt. Die Verwitterungsprodukte können nicht abgeschwemmt werden und der Verwitterungsprozeß kann unter der Schutzwirkung des Waldes bis in sehr große Tiefen fortschreiten, so daß die Verwitterungsprodukte liegen bleiben.

Der Wald in der subnivalen Klimaprovinz, also in unseren Gegenden, reguliert den Wasserabfluß und wirkt als Schutz gegenüber der Abschwemmung, namentlich an den Gebirgshängen.

Von den 101 450 cbkm Niederschlägen peripherischer Gebiete der festen Erdoberfläche werden nach Fritzsche 30640 cbkm durch die Flüsse dem Meere zugeführt, während der Rest mit 70810 cbkm vom festen Lande verdunstet.

(Andere Berechnungen von Murray, Woeikof, Reclus, Brückner, Meinardus).

Die ariden Gebiete sind aus dem Kreislaufe gleichsam ausgeschaltet. Aller Niederschlag verdunstet. Erfolgt aus benachbarten Gebieten Wasserzufuhr, so kann auch diese wieder in die Atmosphäre abgegeben werden, solange sich die erwähnte Trockengrenze nicht verschiebt.

Die Durchlässigkeit der verschiedenen Gesteine, Verwitterungsprodukte und Bodenarten kommt weiter in Betracht für das Verhältnis von Abgabe an den Untergrund zu Abfluß und Verdunstung. Ein vollkommen undurchlässiges Gestein gibt es nicht, nur schwer durchlässige gegenüber leichter durchlässigen. Selbst der als undurchlässig geltende Ton vermag eine gewisse Menge Wasser aufzunehmen, aber nur sehr wenig an den Untergrund abzugeben, so daß nur sehr wenig Wasser durch ihn hindurchgeht. Kompakte, poren- und kluftfreie Gesteine leiten wenig Wasser hindurch. Poren, Hohlräume, Spalten und Klüfte führen erst das Meteorwasser ab. Kompakter Kalkstein ist schwer durchlässig; er wird leicht durchlässig durch die intensive Zerklüftung, die ihm meist zukommt.

Von dem in den Boden eindringenden Wasser wird ein Teil an den einzelnen Körnern hygroskopisch, durch Oberflächenspannung, durch Adsorption oder Kapillarwirkung festgehalten. Ein anderer Teil, den Ramann als Senkwasser (gravidation water der Amerikaner) bezeichnet, kann absickern und an den Untergrund abgegeben werden. Dieses Senkwasser ist abhängig von der Vegetation, dem momentanen Wassergehalt des Bodens, dem Zeitabstand zwischen den Niederschlägen, der Stärke derselben, der Korngröße und der Lagerungsweise der Bodenkörner, dem Gehalt an Kolloiden, dann der Wasserkapazität, der Mächtigkeit der beobachteten Schicht und wiederum bei Gesteinen von deren Klüftigkeit. Ueber die einzelnen Anteile bei verschiedenen Bodenarten liegen besondere Untersuchungen und Zusammenstellungen vor (Wollny, Ramann, Mitscherlich).

Die Menge, die ein Boden dauernd festhält, wird als die Wasserkapazität bezeichnet. Die Menge des aus einem Boden abfließenden Wassers wird in den Sickerwassermengen gemessen, die außer von den eben erwähnten Umständen, von der Tiefe der Entnahmestellen (Drainröhren) abhängen. Genauere allgemein gültige Regeln über diese Sickerwassermengen sind nicht aufzustellen. Einige Regeln geben die Ziffern auf Seite 867 (nach Lueger).

Ueber das Wasserfassungsvermögen der verschiedenartigsten Gesteine, über deren Porosität, liegen zahlreiche Untersuchungen, allerdings nicht nach einheitlichen Methoden vor. Zusammenstellungen geben Lueger (Wasserversorgung der Städte S. 217 und 219) und Hirschwald (Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung Bd. I, Berlin 1911). Nach Lueger steigt die Aufnahmefähigkeit des Wassers von 0,5 l pro cbm Gesteinsmaterial bei Graniten bis zu 568 l bei „schwarzem humosen kalkigem Lehmsandboden". Charakteristisch ist das schwankende Aufnahmevermögen der Sandsteine zwischen 6,2 und 398 l pro cbm. Aehnliche schwankende Ziffern liefern Kalksteine nach wechselnder Zusammensetzung und Struktur.

Obige Daten genügen zum Nachweis, daß der Satz von Delamétherie unrichtig ist und daß das Verhältnis von Ablauf zu Verdunstung und Sickerwasser keiner allgemein gültigen Regel unterworfen ist.

4. Die chemische Zusammensetzung der Niederschläge. Regenwasser gilt als chemisch

Ort	Tiefe der Drainage unter Boden mm	Bodenart	Mit oder ohne Vegetationsdecke	Regenfall mm	Sickerwassermessungen i. Prozenten des Regenfalls				
					Frühling	Sommer	Herbst	Winter	Jahr
Abbotshill	914	sandiger Lehm	mit	659	30,3	1,7	54,1	83,9	42,3
Lee Bridge	914	Sand	ohne	653	—	—	—	—	83,2
Lee Bridge	914	lehmiger Sand	mit	653	—	—	—	—	26,6
Görlitz	1250	Ton	ohne	652	36,1	29,3	26,5	19,0	28,1
Görlitz	1250	Lehm	ohne	652	52,4	45,6	28,6	29,9	41,0
Görlitz	1250	sandiger Lehm	ohne	652	49,7	42,4	27,9	37,7	40,5
Tharand	1250	Ton	mit	739	59,0	21,3	20,9	84,4	40,8
Moholz	1250	Lehm	mit	739	89,7	36,0	32,9	92,0	58,7
Oberdöbling	1264	Lehm	ohne	654	43,3	41,0	24,4	32,0	32,8

reines Wasser, trotzdem es zahlreiche gelöste Gase und Salze je nach Ort, Zeit, Menge der Niederschläge, allgemeinen klimatischen Verhältnissen und Einflüssen des Menschen aufweist. Systematische vergleichende Untersuchungen über die Zusammensetzung des Regenwassers in den verschiedenen Gebieten liegen nicht vor. Das Regenwasser führt eine Menge Staub zur Erde, indem die Kondensation des Wasserdampfes zumeist an feine Staubteilchen der Atmosphäre gebunden ist, und der Regen die schwebenden Bestandteile mechanisch niederschlägt.

Die Luft ist nahe dem Meere reich an Kochsalz, das von Meteorwasser aufgenommen wird. Je nach Meeresnähe und herrschender Windrichtung wechselt der Kochsalzgehalt der Niederschläge. Bei Landsend wurde bei starkem Südwestwind in 10000 Teilen Regenwasser 2,18 Teile Cl (= 3,591 NaCl), in England an der Küste allgemein 0,546 Teile Cl, im Innern des Landes 0,022 Teile Cl, in Paris bis 0,0462 Teile Cl, in Ootacamund, Indien 0,003—0,004 Teile Cl nachgewiesen.

Posepny suchte 1877 sogar zu zeigen, daß alles Kochsalz des Meteor-, Fluß- und Seewassers, auch der abflußlosen Gebiete, aus dem atmosphärischen Kreislaufe herrühre. Dubois bestimmte die durch Regen auf ein 310 qkm großes Küstengebiet Hollands gelangte Kochsalzmenge auf jährlich 6000000 kg. Kohlrausch wies für Regen in den Alpen auf elektrolytischem Wege einen Salzgehalt unter 0,0002% nach.

Reichlicher werden gasförmige Bestandteile von Regenwasser aufgenommen, besonders zu Beginn des Regens. Kohlensäure wird nicht nur durch die Tätigkeit der Pflanzen, sondern auch durch Lösung im Regenwasser aus der Atmosphäre entfernt. Nach van Bebber geht man nicht weit fehl, wenn man auf jedes Liter Niederschlagswasser 1,5 ccm Kohlensäure rechnet, was bei einer durchschnittlichen jährlichen Regenmenge von 70 cm oder 700 l pro qm für ganz Deutschland 566730000 cbm oder 1120400 Tonnen ausmacht.

Man berechne nach der Ziffer über die Lösung von Kohlensäure im Niederschlagswasser und aus den Ziffern von Fritzsche über die Menge des Niederschlags auf den Ozeanen, wie groß die Zufuhr an Kohlensäure und anderen Gasen für das Meer ist, um damit auch die auf S. 862 berührte Bedeutung des Meteorwassers für den Ozean weiter zu würdigen.

Ebenso wird das aus Verwesungsprozessen hervorgehende Ammoniak entfernt. Ein Liter Niederschlag enthielt zu Dahme (Deutschland), 1885 1,4 mg, Regenwalde (Deutschland) im Mittel 2,6, zu Rothamsted (England) 1,4, in England auf dem Lande 0,97, in der Stadt 5,14, in Schottland auf dem Lande 0,53, in der Stadt 3,81, in Glasgow 9,06 mg. Salpeter und salpetrige Säure lassen sich ebenfalls in den Niederschlägen nachweisen. Es liegen hierüber mannigfache Untersuchungen vor (bei van Bebber ältere Zusammenstellungen). N. H. J. Miller berichtete über wichtige, zu Rothamsted seit 1852 von agronomischen Gesichtspunkten aus angestellte Beobachtungen.

Das Regenwasser zu Rothamsted enthielt danach im Mittel NH_3 0,440, N_2O_5 (+ N_2O_3) 0,183, Cl 2 2, SO_3 2,6 mg pro l, wobei sich namentlich zeitliche Unterschiede zeigten. Bei einer mittleren Niederschlagshöhe von 72 cm wurden hiernach dem Boden jährlich 5,8 kg Stickstoff, 16,65 kg Chlor und 19,50 kg SO_3 auf 1 ha zugeführt.

Gray bestimmte zu Lincoln, Neu Seeland, die mittlere Zusammensetzung der Verunreinigungen des Regenwassers, während zweier Jahre zu durchschnittlich 23,06 mg pro Liter, wobei Cl 7.74, SO_3 2,01, N in NH_3 0,12, N in Nitraten 0,14 mg betrug. Die Stadtluft ist reicher an Ammoniakverbindungen wie die Freiluft. Salpetersäure zeigt sich auch nach Gewittern häufig als ein nicht unbeträchtlicher Bestandteil der Niederschläge. Das Regenwasser der Tropen soll 10mal reicher an Nitriten und Nitraten als das unsrige sein. Es wird aber auch darauf hingewiesen, daß ein großer Teil der genannten gasförmigen Verbindungen durch die Boden-

bestandteile aus der Atmosphäre direkt absorbiert wird.

Die Angaben über Rothamsted deuten die Rolle an, die schweflige Säure und Schwefelsäure, namentlich erstere, stellenweise haben. Sie gelangen in die Luft in vulkanischen Gegenden, in Städten, wo Steinkohle verbrannt wird, in der Nähe von Schwefelsäure-, Soda-, Ultramarinfabriken, wie von Röstanlagen. 1000 Zentner Steinkohle geben durchschnittlich 15 Zentner schweflige Säure. Schweflige und Schwefelsäure werden vom Regenwasser begierig absorbiert. W. J. Russel beobachtete in Regenwasser (g pro l) zu London

	SO_2	HCl	NH_3	Organ. Stoffe
Hamiltonterrase	0,0135	0,0093	0,0023	0,0060
Bartholomews	0,0241	0,0131	0,0028	0,0080

Er fand in Tau (g pro l) SO_2 0,0382, HCl 0,0188, NH_3 0,0079, wobei der Gehalt bei trübem Wetter, noch mehr bei Nebel, stieg. Auf dem Lande fand er in gleichen Mengen Tau 0,0132 SO_2, 0,0003 HCl, 0,0046 NH_3. Noch größer ist die Absorptionsfähigkeit des Schnees. R. Sendtner fand in 1 kg Schnee in München 20,2 bis 48,0 mg SO_2, die schon in kurzer Zeit zu Schwefelsäure oxydiert werden, sich aber auch ständig vermehren durch weitere Absorption und durch Verdunstung des Schnees. So stieg der Gehalt des Schnees an SO_3 von 32,80 mg pro kg in 12 Tagen auf 91,50 mg pro kg. Indirekt können diese Beimengungen der Niederschläge größere geologische Bedeutung erlangen. Wenn in der Nähe von schweflige Säure liefernden Orten (z. B. Röstanlagen) alle Vegetation zum Absterben gebracht ist, können die Niederschläge erheblichere mechanische Wirkung entfalten, die feinen Bodenteilchen talabwärts tragen, die Oberfläche der Humusdecke, ja der ganzen oberen lockeren Bodenschicht berauben. Bedeutung hat die schweflige Säure der Luft und der Niederschläge für unsere Bauten, auf die sie gelangt durch direkte Adsorption, wie mit dem Regen und dem Stadtruß, einem Gemenge von Kohle, öligen Substanzen und anorganischem Staub mit schwefliger Säure, das vom Regen nicht weggewaschen wird.

Auch noch seltenere Verunreinigungen kommen mit den Niederschlägen auf die Erdoberfläche, so daß wir, allerdings verschieden je nach dem Orte und der Zeit, nach Nähe oder Entfernung von industriellen Anlagen, in den Niederschlägen beobachten: Staub, und zwar anorganischen (Kohle- und Metallteilchen, besonders Eisen, reichlich in der Nähe der Großstädte), organischen und organisierten (Mikroorganismen), Ammoniak, Ammoniumnitrat, -nitrit und -carbonat, Schwefelsäure, schweflige Säure, Schwefelwasserstoff, Salzsäure, arsenige Säure, Zinkoxyd, Bleioxyd, Kochsalz, Spuren vom Mg- und Ca-Salzen, weiter Kohlensäure, Stickstoff, Sauerstoff, Ozon, Wasserstoffsuperoxyd. Auch Edelgase, besonders Argon und Helium, Neon, Krypton, Xenon ließen sich in den Niederschlägen nachweisen. Die Radioaktivität des Schnees, der Hagelkörner ist größer, wie die des Regens.

Mit den Niederschlägen wird oft aus weit entlegenen Gebieten herrührender Staub zur Erde zurückgeführt. Dieser Staub ist namentlich nach vulkanischen Eruptionen und zur Zeit längerer, gleichmäßig gerichteter heftiger Winde (Vesuvasche, Saharastaub in Norddeutschland), vor allem im Winter auf dem Schnee, beobachtet worden.

Dringen die Niederschläge in den Boden ein, so wirken sie auf Mineralien und Gesteine ein, nehmen Substanzen auf und verändern sich damit oft schon ziemlich rasch.

5. Wirkungen der Niederschläge auf die Erdoberfläche. Die Meteorwasser wirken auf die Erdoberfläche zerstörend, transportierend und neubildend. Alle drei Wirkungen setzen mechanisch oder lösend ein. Die erörterten regionalen und lokalen Aenderungen des Niederschlages bedingen wechselnde Wirkungen.

5a) Mechanische Wirkungen *α*) Verdichtung des Bodens. Bei flacher Lagerung und ohne den Schutz dichter Vegetation bewirken länger anhaltende Regen eine Befestigung der obersten lockeren Bodenschicht. Die Krümelstruktur des Bodens wird zerstört; die vorhandenen Poren und Hohlräume werden verstopft. Ein sonst gut durchlässiges Gestein nimmt bald in seiner obersten Verwitterungsschicht, vor allem im humiden Reiche, besonders in der subnivalen Klimaprovinz (peripherische Gebiete der gemäßigten Klimate), nur wenig Wasser noch auf. Der Wald verringert diese mechanische Regenwirkung. Die starke Verdunstung in dem ariden Reiche wirkt dieser Bodenbefestigung entgegen, indem das auch nur in geringe Tiefen eindringende Wasser lösliche Bestandteile aufnimmt, bei der Verdunstung nahe der Oberfläche wieder ausscheidet und dabei die Oberfläche lockert. Damit hängt dann auch die gleichmäßige feinkörnige Struktur der obersten Bodenschicht in ariden Gebieten, speziell in den Steppen zusammen. Eine vergleichbare Wirkung kann der Frost ausüben, indem das frierende Wasser die einzelnen Krümel zersprengt und den Boden lockert (Wirkung der Brache im Winter).

β) Abrutschbewegungen. Bei geneigtem Gehänge nehmen schwer durchlässige Gesteine größere Wassermassen nicht auf. Lockere Massen, oder durch einen vorhergehenden Umwandlungsprozeß zerkleinerte feste Gesteine werden vom Wasser durchtränkt und bewegen sich abwärts. So entstehen manche Bodenbewegungen, Bergrutsche, Schutthänge, Stein-

ströme, Gehängerutschungen, Bergschlipfe, Wildbäche und Muren. Der Wald (Schutzwald, Bannwald) kann dieser Bewegung Einhalt gebieten. Für Bergschlipfe ist das Vorhandensein einer undurchlässigen Schicht in geringer Tiefe notwendig. Diese undurchlässige Schicht ist dem Schichtverbande eingeschaltet oder durch Verwitterung entstanden, kann auch durch Frostwirkung bedingt sein. Die undurchlässige Schicht bedeckt sich mit einem schlüpfrigen Brei, auf dem sich die festen oder lockeren Massen abwärts bewegen. Aus vielen Darstellungen seien zwei Bilder, beide nach A. Heim, herausgegriffen, von denen das eine (Fig. 1) den Bergsturz von Goldau zeigt,



Fig. 1. Bergsturz von Goldau. Nach A. Heim.

eine Bewegung auf einer durch Regen — und Schmelzwasser durchtränkten Mergelunterlage. Der Felssturz von Elm (Fig. 2), gibt

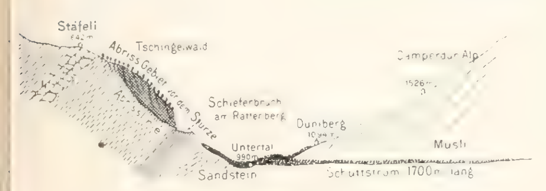


Fig. 2. Felssturz von Elm. Nach A. Heim.

den Abriß der vom Wasser durchtränkten, durch Steinbruchbetrieb unterhöhlten Felsen quer zur Schichtung. Die Mittelgebirge zeigen ähnliche Schuttbewegungen in nicht so großem Maßstabe wie in den Hochgebirgen. Die Fläche, auf der die Bewegung erfolgt, kann die Grenzfläche verschiedenartigster Gesteine sein. Die Bergstürze am Unkelstein gegenüber Unkel am Rhein, wo durch die Erosion des Rheines ein großer Teil der trichterförmigen Ausfüllung des Zufuhrkanals eines Basaltberges angenagt ist, zeigen einen am Gehänge befindlichen Rest der Basaltmasse in einer Abwärtsbewegung, 1846 besonders verheerend. Recht häufig sind Bergrutsche in entwaldeten Gebieten. A. Heim, der sich häufiger mit alpinen Bergrutschen beschäftigte, teilt diese ein in 1. Schuttbewegungen: a) Schuttrutschungen, b) Schuttstürze, 2. Felsbewegungen: a) Felsrutschungen, b) Felsstürze. Ueber die in Deutschland beobacheten Bodenbewegungen gibt A. Braun seit 1909 Zusammenstellungen in Petermanns Mitteilungen (Gotha, Band 55 u. ff.).

γ) Schuttablagerungen. Aus den verschiedensten Abrutschmassen entwickeln sich Schuttströme, Steinströme, die oft nur wenig vom Wasser durchtränkt sind. Wildbäche, Murbrüche, Murgänge stehen im Prinzip mit den Bergrutschen und einem Teile der Steinströme in Zusammenhang. Sie hängen von den Niederschlägen, raschen Schneeschmelzen, allgemein von rasch anschwellenden Wassermassen in Gebieten der Anhäufung von Gebirgsschutt ab. Gesteinsmaterial, grob und fein, Schutt und Schlamm wälzen sich, oft mit nur wenig Wasser durchtränkt, talabwärts. Vielfache Ingenieurkonstruktionen zur Verbauung dieser lebendigen Schuttmassen können die verderbliche Wirkung oft kaum einhalten. An der Ausmündung der Täler dieser Wildbäche, an der Basis der Abhänge, auf der die gleitende Bewegung erfolgt, dort, wo das Gefälle zur Vorwärtsbewegung nicht mehr ausreicht, sammeln sich die Schuttmassen als Schuttkegel, Schutthalden, Schutthänge und Schuttleisten an. Sie sind nicht nur im Hochgebirge, sondern auch in den Mittelgebirgen und in den Tiefländern, hier nicht so augenfällig wie im Hochgebirge, zu finden. Die Schuttkegel finden sich vor allem an der Mündung der kleineren Täler mit starkem gegen breitere und größere Täler mit schwachem Gefälle. Der Böschungswinkel nasser Schuttkegel beträgt 3 bis 30°, derjenige trockener 27 bis 43°, wogegen sie in stehendem Wasser steiler sein können, als in Luft. Die Schuttkegel an der Ausmündung der Nebentäler sind direkt mit Deltabildungen zu vergleichen. Schutthalden und Schutthänge entstehen dort, wo sich der Schutt am Fuße der Gehänge oder über diese in ihrer ganzen Ausdehnung ausbreitet. Dort wo klimatische Faktoren durch längere Perioden hindurch gleichmäßig auf eine Seite der Talgehänge wirkten (Regen, Wind, Sonne wechselnd) sind diese Schuttmassen oft auf eine Talseite beschränkt. Schuttleisten entstehen beim Uebergang steilerer zu flacherer Böschung, oft nur in schmalem Bande. Die Abrutschmassen, Abschlemmassen auf den sogenannten Flachlandblättern der norddeutschen geologischen Karten weisen vielfache Beispiele für ähnliche Bewegungen unter dem Einflusse der Meteorwasser nach. Jedes auch noch so flache Gehänge zeigt Abwärtsbewegung (Kriechen, creep) der lockeren mit Wasser durchtränkten Schuttmassen in dem sogenannten Gekriech, welches sich abwärts bewegt, bestehend aus den tonigen Verwitterungsprodukten der zerstörbaren Gesteine, durchspickt mit den widerstandsfähigen Gesteinen der höheren Berglehnen. Diese Schuttbewegungen sind in den Mittelgebirgen oft nur wenig beachtet, häufig als glaziale Erscheinungen angesprochen worden, ohne daß diese Deutung notwendig war. Die meisten geologischen Karten der

Mittelgebirge stellen diese Schuttmassen nicht dar. Die neue württembergische geologische Spezialkarte 1:25000 nimmt auf diese Schuttmassen mehr Rücksicht und auch anderwärts wird man in Zukunft diesen Schutt wegen seiner morphologischen, agronomischen und hydrologischen Bedeutung mehr beachten müssen.

δ) Hakenwerfen. Auch geringmächtige Schuttmassen wirken auf den Untergrund ein. Schichten sedimentärer Gesteine bei flacher und aufgerichteter Lagerung, plattige Absonderungsstücke eruptiver Gesteine werden nahe der Oberfläche zerbrochen,

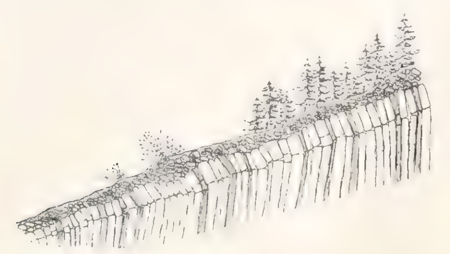


Fig. 3. Hakenwerfen, Schleppung der Schichten durch den Druck des kriechenden Abhangschuttes.

in der Bewegungsrichtung des Schuttes umgebogen („Hakenwerfen" Fig. 3). Die Erscheinung ist fast überall in Steinbrüchen und kleinen Anschürfungen am Gehänge der Täler zu beobachten, an deren Flanken lockerer, durch die Verwitterung hervorgerufener Schutt, oder auch nur eine dünne lockere Bodendecke lagert und, der Schwerkraft des wasserdurchtränkten, wie auch gefrorenen Schuttes folgend, talwärts wandert.

ε) Abschwemmung. Wenn eine größere Bewegung nicht eintritt, werden die feineren Verwitterungsprodukte durch die Regengüsse talwärts befördert und kleinen oder großen Sedimentationsbecken zugeführt. Eine allmähliche Anreicherung der Gehänge mit grobem Schutt findet statt. Das Gehänge wird damit der feineren, für die Vegetation nutzbaren Bodenteilchen beraubt. Die den Boden erhaltende Wirkung des Waldes zeigt sich in hervorragendem Maße (S. 865 bis 866). Unvernünftige, meist habgierige Abholzung hat in vielen Gebieten (französische Alpen am Ende des 18. Jahrhunderts, Muschelkalkhänge Mitteldeutschlands im Mittelalter, Apennin, Griechenland, Südportugal und andere) die Gehänge freigelegt, so daß die Abtragung einsetzt. Aufwendung ganz erheblicher Mittel ist nötig, um diese Gebiete wieder anzuforsten und die abtragende Wirkung des Meteorwassers zu verlangsamen.

ζ) Felsenmeere. Massige Gesteine lockern sich unter dem Einfluß der Verwitterung (siehe diese) von Spalten, Klüften, besonders den Absonderungsfugen aus. Gleiches gilt für Sedimente mit Klüftung und verwitterbaren Bestandteilen oder Bindemitteln. Die Niederschläge führen die an den Klüften gelockerten Massen fort. Die zwischen den gelockerten Massen befindlichen frischen Blöcke werden freigelegt und bleiben als wirres Haufwerk liegen. Die Entstehung vieler Felsenmeere ist auf diese Weise zu erklären. Die körnigen Eruptivgesteine in stark zerschnittenen Gebirgen (Odenwald, Schwarzwald, Fichtelgebirge, Harz, Riesengebirge, Alpen und andere Hochgebirge) bieten Beispiele für diese Felsenmeerbildung. Auch die Blockgipfel beruhen zum großen Teil auf der mechanischen Fortführung der leichter verwitterbaren oder löslicheren Gesteine oder der Fortführung eines Teiles der von den Klüften, Schichtungsfugen aus durch die Wirkung der Meteorwässer angegriffenen Gesteine. Auch die Gipfelform der Berge und die Ausbildung der Abhänge ist in den meisten Fällen bedingt durch das Zusammenwirken von Verwitterung mit mechanischer und lösender Tätigkeit der Meteorwässer, unterstützt von dem Spaltenfroste und der Eigenbewegung der gelockerten Massen unter der Einwirkung der Schwerkraft.

η) Erdpyramiden. Die mechanische Kraft des Regens zeigt sich auffällig in den Erdpyramiden, Erdpfeilern, deren Bildung auch durch andere Faktoren beeinflußt wird. In Schuttmaterial an flachen und steilen, am besten an vegetationslosen Hängen kann der Regen lange Rillen mit mannigfachen Kämmen und Verästelungen (z. B. an lockeren Sanden, lockeren Schutthalden, vielfach auch an Steinbruchshalden beobachtet), bei längerem Bestande schlanke oder plumpe Pfeiler, einzeln oder zu vielen geschaart, herausmodellieren. Die Größe der Pfeiler hängt wesentlich von der Mächtigkeit des Schuttes, von der Dauer gleichmäßiger Regen und dem Fehlen zerstörender Einwirkungen ab. In den deutschen Mittelgebirgen, auch im Flachlande, treten sie, meist nur von kurzer Dauer, in dem Abhangsschutt, dem Gekriech, an vegetationsfreien Hängen, oft an den Wänden der Hohlwege oder auch auf abgeschwemmten Aeckern in winzigen, oft nur wenige Zentimeter hohen Nadeln und stumpfen Pfeilerchen hervor. Sie werden zerstört durch Insolation, den Wind, die allgemeine physikalische und chemische Verwitterung. Anders ist es in den mächtigeren glazialen Schuttmassen, auch solchen älterer Perioden. Auch Breccien, Konglomerate, tiefgründige Verwitterungsböden, Laterit, vulkanische Tuffe zeigen gelegentlich gleiche Formen.

Die Erdpyramiden werden beeinflußt durch die mechanische Kraft des fallenden

Tropfens, die erodierenden, abrinnenden Wasser, den festen Zusammenhalt, eine gewisse Bindigkeit der ganzen Schuttmasse, womit aber eine verhältnismäßig leichte Zerfällbarkeit durch fallendes und fließendes Wasser verbunden sein muß. Es scheint auch, daß das tonige Bindemittel bei der Herausarbeitung der Pyramiden eine besondere Rolle spielt, was sich darin zeigt, daß aus leicht verwitternden Sandsteinen, aus Kreide, noch weniger aus Dolomit und Kalk, keine derartig feinen Gebilde herausgearbeitet werden. Wilhelm Graf zu Leiningen macht darauf aufmerksam, daß die Erhaltung wesentlich begünstigt wird durch rasche völlige Austrocknung, so daß der Spaltenfrost die feinen Gebilde nicht zerstört. Der Rohton der haltbaren Erdpyramiden nimmt aber wiederum erhebliche Wassermassen auf, ohne daß ein Zerfall eintritt.

Am bekanntesten sind die Erdpyramiden vom Ritten bei Bozen in Tirol. Täler sind hier mit Moränenschutt ausgefüllt. Aus ihm sind die Pyramiden herauspräpariert, zumeist mit einem Deckstein versehen, der einem Geschiebe der Moräne entspricht. Der Deckstein ist nicht unbedingt zur Erhaltung nötig. Sind die Geschiebe ungleichmäßig in dem Schutte verteilt, so erhalten die nebeneinander befindlichen Erdpyramiden wechselnde Höhe. Liegen die zu Decksteinen Veranlassung gebenden Körper in einem Horizonte, so werden die Erdpyramiden gleich groß.

Die Erdpyramiden bei Bozen erreichen Höhen von 30 m; zahlreiche mit 12 m Höhe sind anzutreffen, 6—8 m ist die Durchschnittshöhe. Sie sollen in Colorado bis 100 m Höhe erreichen. Die Form kann auch in scharfe Schneiden übergehen. Zahlreiche Erdpyramiden sind auch aneinander gereiht; sie sind dann aus einer längeren, am Gehänge herablaufenden Leiste herausgeschnitten. Oft kann der Deckstein weit über die darunter liegende weiche Schuttmasse hervorragen, so daß die Pyramiden die Form gigantischer Pilze annehmen.

Andere „Pilzfelsen“ verdanken ihre Entstehung den Verwitterungsvorgängen und sind mit den hier besprochenen nicht zu verwechseln.

Erdpyramiden sind außer in der Bozener Gegend an vielen anderen Stellen Tirols, z. B. an der Brennerstraße, im Pustertale (Gödnach—Görtschach), bekannt geworden. Man nennt sie von vielen Stellen der Ost- und Westalpen, überall im Bereiche der alten Vergletscherungen. Andere europäische Gebirge weisen sie ebenfalls auf. Aus Asien werden sie erwähnt in großartigen Formen aus dem Himalaya, Altai, Kaukasus, Kurdistan und Transkaukasien („Tuffpyramiden“), dem östlichen Kleinasien. Auch von zahlreichen Stellen Nord- wie Südamerikas sind gleiche und ähnliche Bildungen beschrieben worden.

ϑ) Regentropfenspuren und Trockenrisse sind als weitere mechanische Wirkungen der Niederschläge zu betrachten. Auf feuchtem Lehm, eingetrocknetem, noch feuchtem Schlamm kann man häufig rundliche Eindrücke beobachten, die von kurzen Schlagregen oder Hagelschauern herrühren. Aehnliche rundliche Eindrücke, die man in älteren Sedimentgesteinen fand, hat man als „fossile Regentropfen“ gedeutet, ohne kritisch in jedem Falle andere Deutungen heranzuziehen. Aehnliche ringförmige Grübchen mit einem Walle entstehen nämlich durch aufsteigende Gasblasen, die teils vulkanischer Herkunft sind, vor allem aber Zersetzungen in mit organischem Materiale beladenem Schlamme entstammen. Wird nach dem Aufsteigen derartiger Blasen das entstandene Grübchen von andersartigem Schlamme überdeckt, so entstehen den Regentropfenspuren ähnliche Gebilde. Diese können in größerer Meerestiefe entstehen, wie die Regentropfenspuren, die nur bei ganz flacher Wasserüberdeckung oder auf gerade von Wasser befreitem Strande oder auf feinkörniger bis toniger Oberfläche sich bilden.

Ein vorübergehender Platzregen in der Wüste erzeugt nach J. Walther bei kleinen Regentropfen ein kleines kugeliges Körnchen im Sande, das wie ein Schrotkorn plastisch hervortritt. Größere und schwerere Tropfen schlagen eine halbkugelige Vertiefung mit oft zackigem Rande in den Sand hinein.

Trockenrisse bilden sich durch die Eintrocknung toniger Gesteine (freigelegte Ufer, eingetrocknete Tümpel). Ein vielfaches Netzwerk von Rissen durchzieht den Ton, die erhalten bleiben, wenn sie durch neue Sedimente oder hinein gewehten Staub ausgefüllt werden.

5b) Lösende Tätigkeit des Meteorwassers. Die Niederschläge lösen ganz oder teilweise die Mineralien und Gesteine einmal direkt, andererseits unter Mitwirkung der aus der Atmosphäre (867 u. f.) aufgenommenen Gase und Salze und endlich infolge der Umwandlungen, die sie selbst in der obersten Bodenschicht erleiden. Neubildungen treten dabei an ihre Stelle. Die direkte Lösung beschränkt sich auf die leicht löslichen Substanzen. Auch schwerer lösliche, wie z. B. sogar der Quarz, sind nicht bestandfähig, da die Auflösung, namentlich in der semini valen und den humiden Klimaprovinzen, durch große Wassermassen erfolgt, mit denen die gelösten Stoffe dem Grundwasser, den Quellen, endlich dem Meere zugeführt werden. Anders ist es in den ariden Provinzen, wo es zu Ausblühungen sogar leicht löslicher Salze kommen kann.

α) Regenrillen oder Riefen sind auf mancherlei Gestein beschrieben und auch mit besonderen Namen belegt worden. Sie sind vornehmlich auf die lösende Tätigkeit des Meteorwassers und die darin gelösten Stoffe zurückzuführen. In den humiden Gebieten darf man sie auf leicht löslichen Ge-

steinen nur unter besonderen Umständen erwarten, im Gegensatz zu den ariden Gebieten, wo man sie auch an Steinsalz beobachtet. In humiden und nivalen Klimaprovinzen werden sie vornehmlich an Gips, Kalkstein und Dolomit beobachtet.

In den humiden Klimaprovinzen ist das Steinsalz oberflächlich meist ausgelaugt und nur an Gehängen unter einer schützenden Decke erhalten, wenn die Niederschläge nicht zu reichlich sind. Man findet Steinsalzausstriche, in Tagebauten aufgeschlossen, zu Cardona in Spanien. Das Steinsalz zeigt die mannigfachsten Regenrillen und Furchen, mit oft messerscharfen Rippen, scharfen Zacken und Pyramiden, auch flacheren Wülsten mit flacheren, auch mehrere Dezimeter tiefen Rillen, die quer zu der Schichtung des Salzlagers gehen und nur selten auf kurze Strecken den mannigfachen Fältelungen und Windungen des Salzes folgen. Aehnliche Bildungen an Steinsalz wurden zu Szovat, Komitat Maros, Torda in Ungarn, nach Haug in Nordafrika aufgefunden. Hierhin gehören auch die Formen an dem Dschebel Usdum, einem Salzberge an der Südwestseite des Toten Meeres. Durch das Meteorwasser werden kleine Grate, Nadeln und Säulen herausgearbeitet. Großartiger müssen sie an dem Salzberge am Toten Meer sein, so daß Blanckenhorn die Erzählung von Lots Weib („Salzsäule") auf diese Erosionsformen zurückführte.

Eine gewisse Parallele zu diesen Erscheinungen am Steinsalz bietet der sogenannte „Büßerschnee", wie er sich auf den Firnfeldern namentlich tropischer und subtropischer Gebiete bildet (Anden Argentiniens, Ecuadors, Kilimandjaro; Berichte von R. Hauthal, H. Meyer und F. Jäger in Zeitschr. d. Ges. f. Erdkunde, Berlin 1908). Der auflösenden Kraft des Meteorwassers wird dort allerdings geringere Bedeutung zugesprochen, wie gleichmäßiger Sonnenbestrahlung und gleich gerichteten Winden.

β) Salz- und Gipsauslaugung. Auswaschungen des Meteorwassers bedingen am Gips dem Steinsalz ähnliche Formen. Sie sind an Zechstein-Gips des Harzrandes mehrfach beobachtet und durch Haug von körnigem Gips aus Algier und Tunis abgebildet worden. Die Auslaugung dringt regelmäßig in den Gips ein, begünstigt allerdings von etwa vorhandenen Klüften, Hohlräumen und Verwerfungen. Im mitteldeutschen Zechstein hat die Auslaugung vor allem die Steinsalz- und Kalisalzlager betroffen, späterhin auch den mit dem Steinsalz wechsellagernden und den hangenden Anhydrit, bezw. den aus ihm entstandenen Gips. Dadurch entstehen Hohlräume, die als Gipsschlotten bezeichnet werden und zu den später zu behandelnden Erdfällen führen. Aus den Lagerungsverhältnissen folgt, daß diese Steinsalz-Gipsauflösung an manchen Stellen, im Gegensatze zu den später zu behandelnden Kalkhöhlen, weit unter die Sohle der benachbarten Täler hinuntergeht. Die Salzauslaugungsoberfläche, der Salzspiegel, des mitteldeutschen Zechsteins liegt nach Fulda (Z. f. prakt. Geol. 1910) im allgemeinen 100 bis 300 m unter der Erdoberfläche. Verschiedene Niederungen Mitteldeutschlands sind auf diese Auslaugung zurückzuführen.

γ) Kalkauflösung, Schratten, Karren. Dauerhafter wie bei Steinsalz und Gips sind die Auflösungserscheinungen am Kalkstein, dolomitischem Kalk und Dolomit. Von der Oberfläche ausgehende Auflösungen führen zur Bildung von Schratten, Karren („lapiez" oder „lézinnes" im französischen Jura). Man begegnet ihnen überall, wo Kalkmassen unbedeckt zutage treten, am ausgedehntesten in den Hochgebirgen, nur wenig verbreitet und oft nur an einzelnen Stücken erkennbar oder unter jüngerem Verwitterungsschutt begraben in den Mittelgebirgen. Das Wasser, das die Oberfläche des Kalkes erreicht, modelliert diese aus, ehe es in den Spalten und Klüften des Kalkes versinkt. Der Kalkstein für sich gehört eben zu den für das Wasser schwerdurchlässigen Gesteinen. Schichtfugen und Zerklüftungen bieten dem Wasser besondere Angriffspunkte. Die verschiedensten Auflösungsgebilde, nicht nur die Schratten und Karren sind deshalb am besten dort ausgebildet, wo durch starke mechanische Beanspruchung eine Zerklüftung geschlossener Kalkmassen eingetreten ist. Ist schon das reine Meteorwasser imstande, Calciumcarbonat in geringer Menge zu lösen, so wird die Lösungsfähigkeit durch Kohlensäureabsorption (vgl. S. 867) erhöht. Die Erscheinung zeigt sich am schönsten an reinen Kalken, von denen keine Verunreinigungen zurückbleiben. Wo der Kalkstein tonige Bestandteile enthält, bildet sich als Auflösungsrückstand eine für das Meteorwasser undurchdringliche Decke und verhindert zumeist weiteren Angriff. Die so gebildeten Auslaugungsrückstände sind in den verschiedensten Klimaprovinzen verschieden zusammengesetzt, für einzelne Gebiete besonders charakteristisch, wie z. B. die Terra Rossa für das Mittelmeergebiet. Wo aber, wie in Hochgebirgen die Verwitterungsprodukte mechanisch rasch fortgeführt werden, da greift die Karrenbildung auch weniger reine Kalke an. Die Bildung erfolgt im wesentlichen durch die lösende Kraft des Wassers, wozu eine mechanisch erodierende erst dann kommt, wenn größere geschlossene Wassermassen wirken. An vielen Stellen ist deutlich eine parallele Anordnung zu beobachten. Hohlkehlen in

der Richtung der Abdachung, oft schmal, oft breiter, verlaufen nebeneinander und an manchen Stellen sind sie wieder durch schief dazu liegende andere Rillensysteme miteinander verbunden. An steilen Felswänden sind sie gleichmäßig parallel gestellt. Sie schneiden dort meist langsam ein, da das Wasser rasch abströmt. Auf horizontalen Kalkplateaus wiederum versinkt das Wasser direkt in Klüften und Spalten, nur kurze Zeit auf die Kalkmasse einwirkend. Die Ausbildung der Rillen ist nicht allein von der Neigung der Kalkoberfläche, sondern auch von den Klüften und Spalten abhängig.

Aus dem Zusammenarbeiten des Ablaufes und des Verschwindens ergeben sich bizarr geformte Felsmassen, die in den Ortsbezeichnungen zum Ausdrucke kommen, wie z. B. im Steinernen Meer, dem Kalkplateau zwischen Königssee und Mittelpinzgau, im Gottesackerplateau im Allgäu, in dem toten Gebirge am Prielstock.

Es muß noch erwähnt werden, daß man zuweilen den Schmelz- und Gletscherwassern eine besondere Bedeutung zugeschrieben hat für die Entstehung dieser Gebilde. Daß glaziales Schmelzwasser mitwirken kann, ist sicher, daß aber Meteorwasser allein die gleichen Gebilde hervorrufen kann, ergibt sich aus der universellen Verbreitung von Karren- und Schrattenfeldern.

Daß auch andere ähnlich lösliche Gesteine gleiche Formen aufweisen, ergibt sich schon aus den Bemerkungen über Gips. Auch Gletschereis weist ähnliche Formen auf, wenn es durch eine Firndecke nicht dem Einfluß der Meteor- und Schmelzwasser entzogen ist. Auf derartige Formen wies Sieger (Geogr. Zeitschr. 1, 182) hin. Vergleiche mit dem Büßerschnee sind Seite 872 bereits berührt.

Das Fehlen einer Vegetation ist Vorbedingung für die Bildung. Steht ein Wald auf einem Karrenfeld, so dürfen wir annehmen, daß dieser von einem solchen erst Besitz genommen hat, daß die Bildung kaum noch weiter schreitet. Die scharfkantigen und zackigen Formen haben mehr gerundeten Platz gemacht.

Das Herausarbeiten unregelmäßig durchfurchter Abhänge, eines ganzen Systems von Rillen und Furchen mit mannigfachen vegetationslosen Kämmen, Graten, Nadeln und Türmen in den Kalkgebirgen (z. B. Dolomiten Tirols) ist abhängig von den Meteorwässern, neben denen auch noch andere Faktoren tätig sind.

δ) Regenrillen an massigen Gesteinen. In massigen, oder aus verschiedenartigen Mineralien aufgebauten Sedimenten können gleiche Bildungen sich nur unter länger anhaltenden gleich gerichteten Niederschlägen ausarbeiten, wie wir dies durch Bornhardt aus Deutschostafrika, durch Brauer an Granitwänden der Seychelleninsel Mahé (Abbildung in Kayser, Allgemeine Geologie) kennen gelernt haben. Lockere Schuttmassen geben mechanisch gebildete Regenrillen, die mit den Erdpyramiden verwandt sind.

ε) Verwitterungstaschen, Dolinen, Erdfälle. Wie das Meteorwasser an der freigelegten Oberfläche unregelmäßige Formen mit vielen kleineren und größeren Vertiefungen schafft, so schreitet der Auflösungsvorgang an allen Gesteinen, die einer teilweisen Auflösung oder auch Umsetzung fähig sind, unregelmäßig in die Tiefe. Das eindringende Meteorwasser hat bald seine Lösungsfähigkeit erreicht; die von der Oberfläche beeinflußten Umwandlungen sind bald beendet. Die verschiedenen Umwandlungsvorgänge schreiten nacheinander, nicht mit derselben Geschwindigkeit, in das Gestein hinein fort. Wir sehen deshalb an einzelnen der Wirkung der Meteorwasser ausgesetzten Gesteinsstücken, wie in der Erdrinde, verschiedene Auslaugungszonen und Umwandlungszonen übereinander, die häufig schon durch ihre Farbe auffallen. Infolge des Wechsels in der niemals ganz ebenen Oberfläche, infolge der wechselnden Vegetation, des schwankenden Gehaltes an verschiedenartigen Umwandlungsprodukten in der obersten Zone und wegen der nie fehlenden kleinen Unregelmäßigkeiten in der Verteilung der angreifbaren Minerale und Gesteine dringen die Auflösungs- und Auslaugungsvorgänge ungleichmäßig vor. Sie hängen auch ab von primären und sekundären Strukturflächen, Absonderungsfugen und Hohlräumen, an und in denen sich das Wasser bewegt. Es bilden sich mit Taschen verglichene Formen, die mit Auslaugungsrückständen ausgefüllt sind oder, wenn das Gestein im ganzen löslich war, frei liegen oder späterhin mit neuen Ablagerungen überdeckt wurden. Die Oberfläche des frischen, nicht aufgelösten oder nicht umgewandelten Gesteines wird so unregelmäßig gestaltet. Man spricht von Auflösungs- und Verwitterungstaschen, gebraucht auch meist den letzteren Ausdruck für beide Erscheinungen.

Die Ausbildung der Taschen im Kalkstein wird gefördert durch die Aufnahme von Kohlensäure aus der Luft und aus Verwesungsprozessen. Legt man Kalksteine von den auflagernden Sedimenten oder dem Verwitterungsschutt frei, so zeigt sich die unregelmäßige Oberfläche mit vielen kleinen und großen Löchern, die oft nach Klüftungen oder Spalten angeordnet sind. Die Form ist trichterförmig, zylindrisch, unregelmäßig begrenzt, wie überhaupt diese auflösende Wirkung des Wassers mannigfaltige Formen schafft.

Mannigfaltig wie die Formen sind deren Namen. Als geologische Orgeln (sinkholes der Engländer, puits naturels der Franzosen) bezeichnet man zylindrische bis kesselförmige, oft auch unregelmäßig trichterförmige Hohlräume, die sich nach der Tiefe hin unregelmäßig zuspitzen, auch stumpf

endigen, oder mit feinen Spalten und Klüften in Verbindung stehen. Erreichen sie größere Dimensionen, so werden sie als Naturschächte bezeichnet, die häufig die schachtartige Verbindung mit sonst nicht zugänglichen Höhlen bilden. Sie erreichen, wie im Karstgebiete Istriens, bis über 100 m Tiefe.

Rundliche schüssel- oder trichterartige Vertiefungen werden als Dolinen, wenn sie mehr in die Länge gezogen sind, als Karstwannen oder Poljen bezeichnet. Auswaschungs- oder Karsttrichter sind ähnliche trichterförmige Vertiefungen (Fig. 4—6). Sie treten einzeln oder geschart auf und bedingen eine eigentümliche, unregelmäßige, „pockennarbige" Oberfläche. Sie entstehen durch Auswaschung von Kalk, zuweilen von Gips, Steinsalz oder anderen leicht löslichen Gesteinen. Die Auswaschung kann von



Fig. 4. Dolinenbildung durch Sickerwasser in massigem klüftigen Kalk. Nach Cvijič.

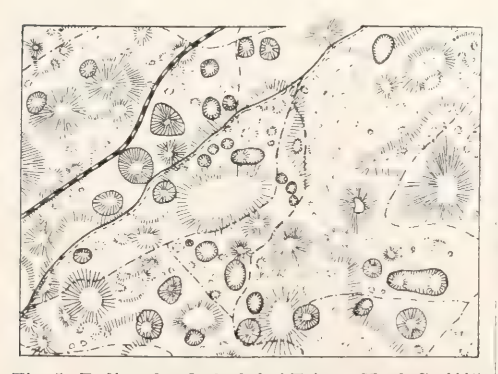


Fig. 5. Dolinenlandschaft bei Triest. Nach Cvijič.

der Oberfläche aus, oder unter dem Schutze eines darauf lagernden Gesteines oder Verwitterungsschuttes erfolgen. Im letzteren Falle bilden sich in dem klüftigen Gesteine (a in Fig. 6) unterirdische Hohlräume (h), deren Dach dann oft plötzlich nachbricht, was eine Einsturzdoline oder einen Erdfall (d) veranlaßt. Einsturzdolinen zeigen das ausgelaugte Gestein (z. B. Kalkstein) auch an der Oberfläche, Erdfälle ein von dem ausgelaugten abweichendes Gestein. Dolinen werden später oft wieder zugefüllt. Eigenartige Lagerungen jüngerer Sedimente in diesen Taschen kommen so zustande. In den Erdfällen wie Dolinen tritt zuweilen Wasser aus, das dann in seiner Zusammensetzung die ausgelaugten Gesteine erkennen läßt. Zumeist aber verschwindet das Wasser in der Doline und dem Erdfalle, immer in den von der freien Oberfläche aus

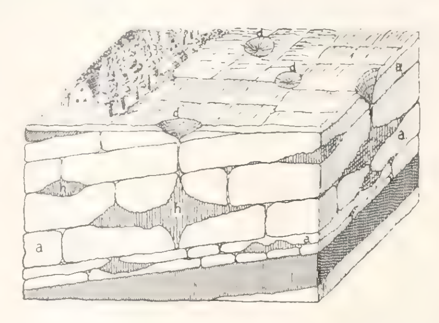


Fig. 6. (Schematisch) Einfache Höhlenbildung, abhängig von Schichtung und Klüftung, und Dolinenbildung, ausgehend von größeren Höhlungen. Z. T. nach Davis-Braun.

gebildeten Karsttrichtern, die dann Einzugstrichter für das Meteorwasser und deren Zusammenläufe sind. Verlegung der unterirdischen Wasserbahnen und des Grundwasserspiegels kann auch hier zu Wasseraustritten führen.

Am reichsten sind alle diese Erscheinungen in der Karstlandschaft, die ihren Namen nach dem Karste hat, jenem Kalkgebirge, das sich von der Laibacher Ebene über Istrien, Dalmatien, Bosnien, die Herzegowina und Albanien bis nach Griechenland erstreckt. Zunächst unregelmäßig nebeneinandergelegt erscheinen die Vertiefungen; unregelmäßig erscheint der Zusammenhang mit den offenen Wasserläufen, die Wasserbewegung in den Trichtern und doch ließ sich ein Zusammenhang mit Sattellinien, Bruch- und Verwerfungslinien nachweisen. Von ihnen aus konnte eben das Wasser am leichtesten angreifen. Alle tektonischen Linien geben die ersten Angriffspunkte für die Auslaugung. Nachdem von Koenen zuerst hierauf aufmerksam gemacht hatte, haben sich auch viele kleinere und größere Verwerfungen Mitteldeutschlands durch Erdfälle nachweisen lassen, die, reihenförmig angeordnet, die von den Spalten ausgehende unterirdische Auslaugung von lösbaren Gesteinsgliedern andeuten.

Bei allen Auswaschungen kann, wie bei der Höhlenbildung, neben der lösenden noch die mechanische, erodierende Wirkung des Wassers hinzukommen. Dies tritt besonders ein, wenn größere Wasserläufe in den Auswaschungstaschen verschwinden.

Die Dimensionen und die Verbreitung dieser Erscheinungen richtet sich nach der Ausdehnung und der Mächtigkeit der lösbaren Gesteine, am häufigsten der Kalksteine. Geringmächtige Kalksteine bringen nur

winzige Erscheinungen hervor. Sind sie steilgestellt, so können größere Auswaschungen einsetzen.

Die Ausbildung aller dieser Formen und die Entstehung der Höhlen (s. unten) ist bedingt durch die Höhenlage über den umgebenden, Wasser führenden Niederungen und Tälern. Von dem nächsten mit Wasser gefüllten Gebiete (Meer, See oder Flußlauf) ist das Gebirge bis zu einer von dem offenen Wasser aus sanft ansteigenden Fläche mit Wasser gefüllt. Die Wasserbewegung und damit die Auslaugung kann nur über diesem Grundwasserspiegel noch auslaugen, Verwitterungstaschen, Dolinen, Karsterscheinungen hervorrufen. Beobachtet man unter dem Grundwasserspiegel noch Auswaschungen, so handelt es sich um mechanische Auskolkungen durch Wasserfälle oder um Gebiete, die früher über dem Grundwasserspiegel lagen und durch Gebirgsbewegungen ihm gegenüber verschoben sind. Komplizierte Wasserbewegung zwischen zwei für Wasser undurchlässigen Gesteinen kann lokal auch Auswaschungen in der Tiefe und damit auch Erdfälle und Dolinen im Niveau des Grundwasserspiegels und darunter herbeiführen. Weiter wird die lösende Kraft nahe der Oberfläche am stärksten sein, wo die nötige Menge Kohlensäure noch im Wasser vorhanden und nicht verbraucht ist.

ζ) Höhlenbildung. Die vorhergehenden Ausführungen geben schon die wesentlichsten Bedingungen für die Höhlenbildung. Wir sehen hier ab von den seltenen Höhlen in Eruptivgesteinen, die entstanden sind durch Gasentbindungen aus dem erstarrenden Magma oder dadurch, daß eine noch flüssige Lavamasse unter der erstarrten Lavaoberfläche weitergeflossen ist. Nur die durch Auslaugung lösbarer Gesteine entstandenen Höhlen werden hier berücksichtigt, speziell im Kalk, Dolomit, Gips und, nur in seltenen Fällen erhaltbar, im Steinsalz. Zur Ausbildung von Höhlen ist notwendig, daß das betreffende Gestein dickbankig oder massig ist, und daß es zerklüftet ist, damit das Wasser von den Klüften aus angreifen kann. Daraus ergibt sich, daß Höhlenbildungen nicht in jedem Kalkgebiete auftreten, sondern daß Höhlengebiete auf bestimmte Kalke beschränkt sind. Die erste Anlage erfolgt durch die durchsickernden Meteorwasser, die nach dem in klüftigen Kalkgebieten tief liegenden Grundwasserspiegel absinken. Die weitere Ausbildung ist außerdem beeinflußt von größeren in dem Kalk versinkenden Bach- und Flußwassern, die dann ein verwickeltes System von unterirdischen Wasserläufen bilden, denen mannigfache Quellen aus dem Nebengestein zufließen können. Als Folge der Lagerungsverhältnisse des Kalkes, der Struktur- und Kluftsysteme, die den Kalk durchziehen, ergeben sich die mannigfachsten Windungen, Weitungen, Verengerungen der Höhlen. Das in diesen Klüften zusammenlaufende, in Spalten und den mannigfachsten oben beschriebenen Auslaugungsformen der Kalkoberfläche versinkende Wasser folgt dem vielfach gewundenen Wege der Höhlen. Es kommt zu Wasseransammlungen (Teiche, unterirdische Seen), zu Wasserfällen, Stromschnellen in dem in den Höhlen zirkulierenden Flußsystem.

Die Auslaugung der fast nie reinen Kalke bedingt die Bildung eines Verwitterungsproduktes, das bei den meist tonigen Verunreinigungen selbst den Charakter eines eisenhaltigen Lehmes besitzt und als Höhlenlehm bekannt ist. Durch ihn können Risse und Spalten verstopft werden; der Wasserablauf kann verlegt und ein neues Stromsystem gebildet werden. Durch die weitere Ausgestaltung der Höhle kann das Dach zusammenbrechen. Ein wirres Haufwerk von Blöcken mit dem Lehm zusammen kann dann dem Meteorwasser den Eingang versperren. In dem Höhlenlehm und diesen breccienartigen Hohlraumausfüllungen finden sich auch mannigfache mit dem Wasser zugeschwemmte Gesteinsstücke, andererseits aber auch die Reste einstiger Höhlenbewohner, einschließlich der prähistorischen und historischen Menschenreste.

Von einem gewissen Stadium ab tritt durch das erodierende Wasser eine Umbildung der Höhlen ein, die zum Schluß zu einem Zerfall der Höhlen führt.

Wie intensiv die Auslaugung ist, zeigen einige Zahlen (nach Knebel). Der Timavo, eine Riesenquelle im Krainer Karste nordwestlich von Triest, entführt bei einer Schüttung von 26620 Sekundenlitern dem Gebirge jährlich 210 000 000 kg Gestein, was einem Volumen von 80700 cbm entspricht. Die Hegauer oder Radolfszeller Aach, in der die bei Immendingen verschwindenden Donauwasser wieder hervortreten, entführt dem Gebirge bei 7000 Sekundenlitern pro Tag 151 000, pro Jahr 55 000 000 kg Gestein. entsprechend einem Raume von 21 000 cbm.

6. Neubildungen durch das Meteorwasser, 6a) Mechanische Neubildungen. Die besprochenen mechanischen Umlagerungen führen zu Neubildungen, deren Namen oben (wie z. B. Schuttkegel, Steinströme, Schutthalden und -leisten) schon angeführt sind. Durch Verschwemmung und Verdichtung der lockeren Bodenmassen erfolgt ebenfalls mechanische Neubildung. Die größten mechanischen Neubildungen erfolgen beim weiteren Forttransport der gelockerten Massen durch die Flüsse, in fluviatilen und endlich marinen Sedimenten.

6b) Chemische Neubildungen. Das Meteorwasser sättigt sich bei genügender Zeit der Berührung mit einer lösbaren Substanz an dieser. Verdampft das Lösungsmittel, so kommt es zur Wiederausscheidung. Andererseits vollziehen sich mannigfaltige Umsetzungen. Aus komplizierteren Verbindungen werden Teile gelöst, die bei Verdunstung zu anderen Neubildungen führen. Neubildungen dieser Art finden wir in

den Kalksteinhöhlen, wo die Verdunstung des Wassers an den Wänden und auf dem Boden zur Bildung von Inkrustationen mit fast immer reinem Calciumcarbonat führt. Kann das Lösungsmittel in ein andersartiges Gestein eindringen, so wird dies mit einem Kalkbindemittel durchzogen und verkittet. Aehnliche Kalksintermassen bilden sich auch an Austrittspunkten der durch Kalkgebiete fließenden Wasser. Dort wo Wasser langsam an derselben Stelle sich zu Wassertropfen sammelt, überzieht

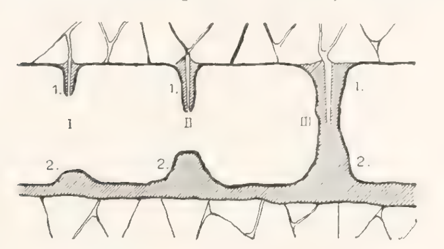


Fig. 7. Tropfsteine, schematisch. Nach Knebel. I. II. III. Verschiedene Entwickelungsstadien. 1. Stalaktiten, 2. Stalagmiten.

sich jeder infolge Verdunstung mit einer dünnen Haut, die beim Abfallen des Tropfens durchreißt. Ein Teil bleibt hängen und setzt einen dünnen Zylinder an, der von den folgenden Tropfen vergrößert wird. Die zylindrische Röhre wird länger (1 in Fig. 7). Außen herabrieselndes Wasser verdickt die Röhre. Es entstehen Stalaktiten oder Tropfsteine. Das am Boden aufschlagende Wasser bringt den Rest der Haut des hängenden Wassertropfens mit. Weiterer Kalk scheidet sich aus und dem Stalaktiten wächst ein Stalagmit (2 der Fig. 7) entgegen, der aber im Gegensatz zu dem Stalaktiten nicht hohl ist. Die Höhlung des Stalaktiten kann zugefüllt werden durch Absatz. Am Boden bilden sich zwischen den unregelmäßigen Erhebungen mit Kalksinter ausgekleidete Sinterwannen, in die von der Decke kleine Gesteinsbruchstücke fallen, oder von der Seite zugeschwemmt werden. Tropfendes Wasser überzieht diese mit Kalkhäutchen, die sich vielfach umeinander legen, wenn ein Festhaften mit dem Untergrunde verhindert ist. Es ist das sogenannte Teufelskonfekt, das in kleinen und großen Formen, auch später wunderlich miteinander verkittet, in Kalkhöhlen, in Stollenbauten, oft bei nur schwach kalkhaltigem Gestein, anzutreffen ist. Die Stalaktiten und Stalagmiten können in großer Zahl nebeneinander sich bilden und veranlassen dann mit den zusammenhängenden Sintermassen und vielfältigen Sinterwannen die prächtigen Höhlenbilder.

Wie die Lösung des Kalks zu Kalkstalaktiten und Stalagmiten führt, so beobachtet man gelegentlich auch Steinsalzstalaktiten, -Stalagmiten und -sinter in Hohlräumen im Steinsalz, Kupfervitriolstalaktiten, -stalagmiten und -sinter und ähnliche, meist sehr zerbrechliche Eisenvitriol-, Eisenhydroxyd- und Manganoxydtropfsteine, auch sinterartige Massen daraus, in Erzgruben oder in Höhlungen in der Nähe von erzführenden Gesteinen.

Als Neubildungen, die durch Lösungsprozesse im Meteorwasser entstanden sind, müßte man auch alle die Substanzen aufzählen, die sich bei den verschiedensten Verwitterungsprozessen bilden, die nach den klimatischen Aenderungen mannigfache Wechsel zeigen (z. B. Laterit, d. h. Aluminiumhydratbildung tropischer Gebiete gegenüber toniger Verwitterung der gemäßigten Klimate). Eine Uebersicht über die Einzelheiten wird im Artikel Verwitterung gegeben. Ein allgemeiner Grundzug der chemischen Einwirkung der Atmosphärilien, des Meteorwassers und der in ihm gelösten Gase, ist die Oxydation, Hydrat- und Carbonatbildung in der Nähe der Oberfläche.

Besondere Neubildungen entstehen im ariden Gebiete. Ausblühungen der Steppe bestehen aus Kochsalz, Gips, Bittersalz und anderen Salzen, die aus dem Gestein durch das absteigende Wasser ausgelaugt, und bei dessen Verdunstung an der Oberfläche ausgeschieden werden. Der Bedeutung dieser Auskristallisation für die Zerkrümelung ist bereits gedacht. Auch die Schutzrindenbildung der Wüste steht im Zusammenhang mit dem Meteorwasser, speziell dem aus der Atmosphäre absorbierten Wasserdampf und der aus dem Gesteine ausschwitzenden Bergfeuchtigkeit.

7. Frostwirkung. Es sind bis jetzt zumeist die Meteorwasser in ihrer Gesamtheit besprochen worden und der Regen ist dabei besonders berücksichtigt worden. Die Angaben über die Klimaprovinzen wiesen aber auch schon auf die Frostwirkung hin. Die Volumvermehrung des Wassers beim Frieren bedingt eine Zersprengung des Gesteinsmaterials, eine fortwährende Zerkleinerung, die um so intensiver wird, je öfter sich das Frieren wiederholt. In der subnivalen Klimaprovinz ist die Wirkung am intensivsten. Die groben Schollen, in die der Landmann den Acker im Herbst umlegt, sind bis zum Frühjahr, bei genügendem Frost, in ein krümeliges Haufwerk zerfallen. Es entstehen auf diesem Wege die sogenannten Spaltenfrostböden, die noch besser ausgebildet sind in der Nähe der Schneegrenze in Hochgebirgen und in arktischen Regionen. Sie zeigen nur geringe chemische Einwirkung und bestehen aus einem meist scharfkantigen Gesteinsschutt, der

dann, beeinflußt von der Gletscherwirkung, in Steinströme, Schuttströme übergeht.

Im Innern von Gesteinen befindliche feine Haarklüfte können vom Eise ausgefüllt werden. Größere Gesteinsplatten werden dabei abgesprengt.

Zum Schlusse sei noch darauf hingewiesen, daß eine scharfe Abtrennung der verschiedenen Wirkungen des Meteorwassers voneinander ausgeschlossen ist. Sie wirken unter der immer wieder hervortretenden Bedeutung des Klimas, der Schwankungen und Aenderungen desselben auf das Gestein nacheinander ein. Die Erdoberfläche selbst ist wieder so mannigfaltig zusammengesetzt, daß dies neue Verwickelungen hervorruft. Endlich aber sind neben dem Meteorwasser viele andere Faktoren für die Ausgestaltung der Oberfläche tätig, auf die in einer kurzen Uebersicht nicht hingewiesen werden kann.

Literatur. *Allgemeines:* ***Th. C. Chamberlain and R. D. Salisbury**, Geology, processes and their results, 2. ed., London 1906. — **W. M. Davis** und **G. Braun**, Grundzüge der Physiogeographie, Leipzig 1911. — **S. Günther**, Handbuch der Geophysik, 2. Aufl., Stuttgart 1899. — **Haug**, Traité de Géologie, I. Les phénomènes géologiques, Paris 1907. — **E. Kayser**, Lehrbuch der allgemeinen Geologie, 4. Aufl., Stuttgart 1912. — **O. Lueger**, Wasserversorgung der Städte, Stuttgart 1893. — **A. Penck**, Morphologie der Erdoberfläche, 2 Bde, Stuttgart 1894. — **E. Ramann**, Bodenkunde, 3. Aufl., Berlin 1911. — **A. Supan**, Grundzüge der physischen Erdkunde, 5. Aufl., Leipzig 1911. — **J. Walther**, Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft, Jena 1893/4.*

*Zu den Abschnitten **1** und **2**: **J. van Bebber**, Hygienische Meteorologie, Stuttgart 1895. — **J. Hann**, Klimatologie, 3. Aufl., Stuttgart 1908.*

*Zu Abschnitt **2**: **J. van Bebber**, Hygienische Meteorologie, Stuttgart 1895. — **Ed. Brückner**, Die Bilanz des Kreislaufes des Wassers auf der Erde, Geograph. Zeitschr. 1905, Bd. 11, S. 436—445. — **E. Ebermayer**, Einfluß der Wälder auf die Bodenfeuchtigkeit, auf das Sickerwasser, auf das Grundwasser und auf die Ergiebigkeit der Quellen, Stuttgart 1900. — **W. R. Eckardt**, Das Klimaproblem der geologischen Vergangenheit und historischen Gegenwart, Braunschweig 1909. — **W. R. Eckardt**, Der Einfluß des Waldes auf das Klima, Deutsches Meteorologisches Jahrbuch für Aachen **13**. Karlsruhe 1909. — **R. Fritzsche**, Niederschlag, Abfluß und Verdunstung auf den Landflächen der Erde, Zeitschr. f. Gewässerkunde, Bd. **7**, Dresden 1906, S. 321—370, Bd. **8**, 1907, S. 74—75. — **G. Hellmann**, Die Niederschläge in den norddeutschen Stromgebieten, 3 Bde., Berlin 1906. — **H. Keller**, Niederschlag, Abfluß und Verdunstung in Mitteleuropa, Jahrb. für Gewässerkunde Norddeutschlands, Besond. Mitteil. Bd. 1, Berlin 1906. — **P. Schreiber**, Die Einwirkung des Waldes auf Klima und Witterung, Tharandter forstliches Jahrbuch 1899, Bd. 49, S. 85—204. — **A. Supan**, Die Verteilung des Niederschlags auf der festen Erdoberfläche, Ergänz.-Heft 124 zu Petermanns Mitt., Gotha 1898. — **J. Walther**, Das Gesetz der Wüstenbildung. 2. Aufl. Berlin 1912. — **J. Weber**, Einwirkung des Waldes auf den Feuchtigkeitsgehalt der Luft. In Lorey, Handbuch der Forstwissenschaft, 2. Aufl., Tübingen 1903.*

*Zu Abschnitt **3**: Die unter **2** zitierten Werke von **Fritzsche, Brückner, Supan** und **A. Penck**, Versuch einer Klimaklassifikation auf physiogeographischer Grundlage, Sitz.-Ber. der Preuß. Akad. d. Wiss., Berlin 1910, S. 236 bis 246. — **S. W. Rafter**, The relation of rainfall to run off, Water supply paper of the United States geological Survey, Nr. 80, Washington 1903.*

*Zu Abschnitt **4**: **F. W. Clarke**, The data of geochemistry, Bulletin 330 of the United States geological Survey, Washington 1908. 2. ed. 1911. — **E. Dubois**, Sur quelle échelle s'accomplit le phénomène de transport atmosphérique du sel marin, Archives du musée Teyler, Ser. II, Bd. 10, Haarlem 1907. — **N. H. J. Miller**, The amounts of nitrogen and organic carbon in some clays and marls, Quart. journ. of geol. soc. London 1903, **59**, S. 133 bis 141. — Journ. of agric. Science 1905, **1**, 280.*

*Zu Abschnitt **5a**: **G. Braun**, Ueber Bodenbewegungen, 11. Jahresber. d. Geogr. Ges. zu Greifswald 1908. — **F. Frech**, Ueber Muren, Zeitschr. d. Deutsch. und Oesterr. Alpenvereines 1898, **29**, S. 1—26. — **G. Götzinger**, Beiträge zur Entstehung der Bergrückenformen, Geogr. Abhandl. herausgeg. von A. Penck, Leipzig 1907. (Reiche Literaturangaben, speziell über pseudoglaziale Schuttbildungen, Gekriech, Hakenwerfen.) — **S. Günther**, Erdpyramiden und Büsserschnee als gleichartige Erosionsgebilde. Sitz.-Ber. der Kgl. Bayer. Akad. der Wiss. math.-nat. Klasse, München 1904, **34**, S. 397—420. — **A. Heim**, Die Bodenbewegungen von Campo im Maggiatal, Kanton Tessin, Vierteljahresschr. d. Naturf. Ges. Zürich 1898, Bd. 43. — **Derselbe**, Ueber die Gestaltung der Schuttbildungen und der Oberfläche. In: Geologie der Hochalpen zwischen Rhein und Reuß, Beitr. z. geol. Karte d. Schweiz, 25. Lief., Bern 1891. — **A. Heim und Buss**, Der Bergsturz von Elm, Zürich 1881. — **Kittler**, Ueber die geographische Verbreitung und Natur der Erdpyramiden, Münchener geogr. Studien 1897, **3**, Dissert. Erlangen. — **W. Graf zu Leiningen**, Ueber Erdpyramiden, Abhandl. d. Nat. Ges. Nürnberg **18**, 1909, S. 57—70. — **W. von Lozinski**, Die periglaziale Fazies der mechanischen Verwitterung, Naturw. Wochenschr. 1911, S. 641—647. — **D. Martin**, Impressions produites par des bulles d'air sur de la vase. Bull. d. l. soc. géologique de France. (4) **4**, 1904, S. 50—53. — **J. Oberholzer**, Monographie einiger prähistorischer Bergstürze in den Glarner Alpen, Beitr. z. geol. Karte d. Schweiz, N. F. 9. Lief., Bern 1900. — **A. Piwowar**, Ueber Maximalböschungen trockener Schuttkegel und Schutthalden, Dissert., Zürich 1903. — **K. Stamm**, Schuttbewegungen, Geol. Rundschau, Leipzig 1911, **2**, S. 162—177 (Literatur). — **B. Stechele**, Die Steinströme der Falklandinseln, Diss. Erlangen, München 1906. — **J. Stiny**, Die Muren, Innsbruck 1910. — **L. Wehrli**, Der Erdschlipf bei Sattel am Roßberg, Zeitschr. f. prakt. Geologie 1910, Bd. **18**, S. 372—380. — **E. Wollny**, Forschungen aus dem Gebiete der Agrikulturphysik, Bd. 1—20, Heidelberg 1878 bis 1898.*

*Zu Abschnitt **5b** und **6**: **E. Chaix-Du Bois***

et **A. Chaix,** *Contribution à l'étude de lapiés en Carniole et au Steinernes Meer, avec une notice sur la Terra Rossa per A. Mornier, Le Globe, Genf 1907,* **46,** *Mém. 17—53.* — **Cvijic,** *Das Karstphänomen; Geogr. Abhandl. herausgeg. von A. Penck, Wien 1893, Bd. 5, Heft 3.* — **M. Eckert,** *Das Gottesackerplateau im Allgäu, Wissenschaftl. Ergänzungshefte zur Zeitschr. des Deutsch. u. Oest. Alpenvereins, Bd. 1, Heft 3, 1902.* — *Zeitschr. d. Deutsch. u. Oest. Alpenvereins 1900, S. 52—60.* — **Alfr. Grund,** *Die Karsthydrographie, Geogr. Abhandl. herausgeg. v. A. Penck, Bd. 7, Heft 3, Leipzig 1903.* — **E. Kaiser,** *Das Steinsalzvorkommen von Cardona, Neues Jahrb. f. Min. 1909, I, S. 14—27. (Literatur.)* — **Kloos und Müller,** *Die Hermannshöhle bei Rübeland, Weimar 1889.* — **W. von Knebel,** *Höhlenkunde mit Berücksichtigung der Karstphänomene, Braunschweig 1906.* — **N. Krebs,** *Die Halbinsel Istrien, Geogr. Abhandl. herausgeg. v. Penck, Berlin 1907, 9. Bd. 2. Heft.* — **G. A. Martel,** *Les abîmes, Paris 1894.* — **Derselbe,** *La spéléologie où science des cavernes, Paris 1900.* — **A. Neischl,** *Die Höhlen des fränkischen Jura und ihre Bedeutung für die Entstehung der dortigen Täler, Nürnberg 1904.* — **W. Prinz,** *Les cristallisations des grottes de Belgique. Nouveaux mémoires de la société belge de géologie. Bruxelles 1908.* — **F. Ratzel,** *Ueber Karrenfelder im Jura und Verwandtes, Univ.-Schrift Leipzig 1891.* — **Tucan,** *Die Oberflächenformen bei Carbonatgesteinen in Karstgegenden, Zentralbl. für Min. 1911, S. 343 bis 350.*

E. Kaiser.

Meyen
Franz Julius Ferdinand.

Botaniker. Geboren am 28. Juni 1804 zu Tilsit, widmete sich zunächst in Memel der Pharmazie und studierte später von 1822 an in Berlin Medizin, worin er 1826 promovierte. Nachdem er einige Jahre als Arzt tätig gewesen war, nahm er von 1830 bis 1832 an einer Erdumsegelung des Schiffes „Prinzeß Louise" teil, die er in 2 Bänden (Berlin 1834 und 1835) beschrieb und von der er mit reichen Sammlungen zurückkehrte. 1834 wurde er Professor in Berlin, wo er bereits am 1. September 1840 starb.

Seine im Lauf verhältnismäßig weniger Jahre veröffentlichten umfangreichen Arbeiten sind vor allem anatomischer und physiologischer Art; ihre rasche Entstehung verrät sich öfter in einer gewissen Flüchtigkeit, doch stellen sie in mancher Beziehung gegenüber seinen Vorgängern Fortschritte (z. B. bezüglich der Zellinhaltsstoffe, der Interzellularräume, der chemischen Vorgänge bei der Ernährung der Pflanzen), aber auch vielfach sehr entschiedene Rückschritte (z.B. gegen Moldenhawer, Mohl, de Saussure u. a.) dar. Genannt seien seine Anatomisch-physiologischen Untersuchungen über den Inhalt der Pflanzenzellen (Berlin 1828), seine Phytotomie mit 14 Tafeln guter Abbildungen (Berlin 1830), Ueber die neuesten Fortschritte der Anatomie und Physiologie der Gewächse (Preisschrift Haarlem 1836), Grundriß der Pflanzengeographie (Berlin 1836), Ueber die Sekretionsorgane der Pflanzen (Preisschrift Berlin 1837), Neues System der Pflanzenphysiologie (3 Bände Berlin 1837 bis 1839), Jahresberichte (1836 bis 1840), Ueber Befruchtung und Polyembryonie (Berlin 1840) und die nach seinem Tode von Nees van Esenbeck herausgegebene Pflanzenpathologie (Berlin 1841).

Literatur. **W. H. de Vries,** *Herinneringen aan F. J. F. Meyen, Amsterdam 1840.*

W. Ruhland.

Meyer
Lothar.

Geboren am 19. August 1830 zu Varel (Oldenburg), gestorben am 11. April 1895 in Tübingen als Professor der Chemie, wo er seit 1876 erfolgreich wirkte, nachdem er zuvor an der Forstakademie in Neustadt-Eberswalde und seit 1870 in Karlsruhe an der Technischen Hochschule tätig gewesen war. Seine Beschäftigung mit theoretisch-chemischen Fragen, seine große Fähigkeit, aus vielen Einzeltatsachen allgemeine Schlüsse zu ziehen, führten ihn zu seiner Hauptleistung, der Aufstellung des periodischen Systems der Atomgewichte (Liebigs Annalen Suppl. 7 S. 354 ff.), unabhängig von Mendelejeff, der in seinen Folgerungen noch weiter ging als Lothar Meyer. Die ersten Anfänge der periodischen Atomistik finden sich in seinen modernen Theorien der Chemie 1864, deren sechste, sehr stark erweiterte Auflage 1896 erschien. Sein Werk Grundzüge der theoretischen Chemie (1890) ist eine vorzügliche Einführung in die Theorien der Chemie. Durch Einzelschriften über die Organisation der Hochschulen und in Fragen der Unterrichtsverhältnisse hat er auf seine Zeitgenossen großen Einfluß ausgeübt. Seine Experimentaluntersuchungen betreffen organisch-chemische und physikalisch-chemische Fragen.

Literatur. *Ausführlicher Nekrolog von* **Seubert** *in Ber.* **28,** *1109.*

E. von Meyer.

Meyer
Oskar Emil.

Geboren am 15. Oktober 1834 in Varel an der Jade; gestorben am 21. April 1909 in Breslau. Er studierte in Heidelberg, Zürich, Königsberg erst Medizin, dann Physik, habilitierte sich 1862 in Göttingen, war seit 1864 Professor der Physik in Breslau. Er arbeitete über Reibung von Flüssigkeiten und Gasen, Erdmagnetismus, Dynamomaschinen. Er ist namentlich durch sein Buch über kinetische Gastheorie bekannt.

Literatur. *Biographie von* **Lummer** *in der Chronik d. Univ. Breslau 1909/10.*

E. Drude.

Meyer
Victor.

Geboren am 8. September 1848 zu Berlin, gestorben am 8. August 1897 in Heidelberg, wo

er seit 1889 als Bunsens Nachfolger höchst erfolgreich gewirkt hat, nachdem er zuvor seit 1872 am Polytechnikum zu Zürich, seit 1885 in Göttingen als höchst anregender Lehrer einen großen Kreis von Schülern um sich versammelt hatte. Als glänzender Experimentator und gedankenreicher Forscher hat er besonders die organische Chemie durch ausgezeichnete Untersuchungen befruchtet: Es seien die über Nitroverbindungen der Fettreihe, über Thiophen, über Oxime, über sterische Hinderung gewisser Reaktionen aus den vielseitigen Arbeiten herausgehoben. V. Meyer schenkte der chemischen Welt seine ausgezeichnete Dampfdichte-Bestimmungsmethode, die er zur Lösung wichtigster Probleme anzuwenden vermochte. Sein mit Jacobson herausgegebenes Lehrbuch der organischen Chemie gehört zu den besten Werken gleicher Art. Der von seinem Bruder Richard liebevoll geschriebene Nekrolog gibt ausführliche Aufschlüsse über das Leben und Wirken dieses seltenen Menschen und Forschers.

Literatur. *Nekrolog von* ***R. Meyer*** *in Ber. 41, 4505.*

E. von Meyer.

Meyerhoffer
Wilhelm.

Geboren am 13. September 1864 in Pinsk in Rußland; gestorben am 21. April 1906 in Meran. Er studierte in Heidelberg und Straßburg, ging 1888 nach Amsterdam, um unter van't Hoffs Leitung sich dem Studium der physikalischen Chemie zu widmen, promovierte 1890 in Leipzig, habilitierte sich 1891 in Wien, ging 1896 nach Berlin, wo er gemeinsam mit van't Hoff ein Laboratorium leitete, das der Erforschung physikalisch-chemischer Probleme diente. Seine zahlreichen Arbeiten bewegen sich auf diesem Gebiet.

E. Drude.

Miarolen.

Meist kleine unregelmäßige Hohlräume im Granit entstanden beim Erstarren des Gesteins (vgl. den Artikel „Gesteinsstruktur").

Mikroskopische Technik.

I. Technische Hilfsmittel.

A. Handhabung des Mikroskopes und seiner Nebenapparate.

Für die wissenschaftliche mikroskopische Forschung ist es dringend erforderlich, daß sich der Beobachter mit der sachgemäßen Handhabung des Mikroskops und seiner Nebenapparate vertraut macht. Eine kritische Beurteilung der im Mikroskop entstehenden Bilder kann nur unter Berücksichtigung der unvermeidlichen Fehlerquellen des Instruments und der Grenzen seines Leistungsvermögens erfolgen. Die verschiedenen Methoden der Beleuchtung und der Abbildung der Objekte sind deshalb stets von diesen Gesichtspunkten aus zu betrachten.

1. Beleuchtungseinrichtungen. 1 a) Lichtquellen. Für die in der Objektebene zu erzielende Beleuchtungsstärke sind drei Eigenschaften der Lichtquelle von Bedeutung: ihre Leuchtkraft, ihre Ausdehnung und ihre Lage. Die Leuchtkraft hängt ab von dem Ausstrahlungsvermögen und der Temperatur des leuchtenden Körpers; sie kann durch keinen Beleuchtungsapparat irgendwelcher Konstruktion verstärkt werden, sie wird vielmehr durch Absorption, Spiegelung und Brechung in solchen Apparaten stets vermindert. Soll also eine größere Intensität der Beleuchtung in der Objektebene erzielt werden, so muß entweder eine Lichtquelle von größerer Leuchtkraft gewählt werden, oder es müssen die durch jene Vorgänge in den Beleuchtungsapparaten eintretenden Verluste möglichst verringert werden. Für die subjektive Beobachtung reichen in den meisten Fällen die gewöhnlichen Lichtquellen, wie diffuses Tageslicht, Petroleum- oder Gaslampe aus, wenigstens soweit es sich um Beobachtung im weißen Licht und im Hellfeld handelt. Bei Beobachtung im Dunkelfeld, bei ultramikroskopischen Untersuchungen, ferner bei Beleuchtung mit spektral zerlegtem oder mit

monochromatischem Licht sowie bei der Mikroprojektion und bei vielen mikrophotographischen Arbeiten müssen Lichtquellen von stärkerer Leuchtkraft, wie elektrisches Glühlicht oder Bogenlicht verwendet werden; auch Azetylenlicht und intensives Gasglühlicht können in manchen Fällen mit Erfolg benutzt werden. Als Lichtquelle von höchster Leuchtkraft kommt natürlich das direkte Sonnenlicht in Betracht.

Ueber die richtige Auswahl der Lichtquelle für bestimmte Beobachtungsmethoden lassen sich kaum allgemeine Vorschriften geben, es muß deshalb auf die Literatur und besonders auf die Gebrauchsanweisungen hingewiesen werden, die die optischen Werkstätten den von ihnen verfertigten besonderen Beleuchtungseinrichtungen beigeben.

Die Ausdehnung und die Lage der Lichtquelle bestimmen die Größe des Oeffnungswinkels der nach den einzelnen Objektpunkten hinzielenden Strahlenbüschel. Wird der körperliche Winkel, den dieser Oeffnungswinkel darstellt, mit ω, der Neigungswinkel, den die Achse des Büschels mit der Objektebene O bildet, mit α (vgl. Fig. 1) und die Leuchtkraft der Lichtquelle mit J bezeichnet, so gilt ganz allgemein für die Beleuchtungsstärke S, die die Flächeneinheit des Objektes empfängt, die Gleichung: $S = J\omega \sin \alpha$.

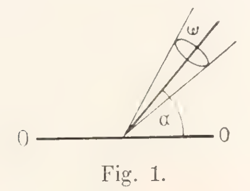


Fig. 1.

Die Stärke der Beleuchtung in der Objektebene würde also ein Maximum erreichen, wenn $\alpha = 90^0$ und ω zu einer vollen Halbkugel wird. Dies wäre bei direkter Bestrahlung des Objekts nur möglich, wenn die Lichtquelle sehr ausgedehnt wäre oder wenn sie dicht an das Objekt herangebracht werden könnte, was aber ausgeschlossen ist. Dagegen ist es in sehr vielen Fällen möglich, durch besondere Einrichtungen ein Bild der Lichtquelle zu erzeugen, von dem aus Strahlenbüschel bis zu 180° Oeffnungswinkel nach dem Objekt hin verlaufen. Da jede primäre Lichtquelle durch eine andere Fläche ersetzt gedacht werden kann, die als eine Zentralprojektion der leuchtenden Fläche selbst anzusehen ist, und der man Punkt für Punkt ihre Leuchtkraft übertragen darf, so erhält man also in dem durch Zentralprojektion entstandenen Bilde eine völlig äquivalente Lichtquelle, wenigstens wenn man von allen durch Absorption, Spiegelung und Brechung entstandenen Verlusten an Leuchtkraft absieht. Kann die Lage dieses Bildes so geregelt werden, daß von ihm aus Beleuchtungsbüschel mit einem Oeffnungswinkel bis zu 180° nach dem Objekt verlaufen, so läßt sich dann durch geeignete Blendeneinrichtungen aus dem ganzen eine volle Halbkugel ausfüllenden Büschel jedes einzelne Teilbüschel von beliebigem Oeffnungswinkel, beliebiger Neigung und Richtung wirksam machen.

1b) Beleuchtung mit durchfallendem Licht. Die meisten mikroskopischen Objekte sind so beschaffen, daß sie mit durchfallendem Licht beleuchtet werden müssen. Bei der gewöhnlichen subjektiven Beobachtung wird die Strahlung der Lichtquelle zunächst durch einen Spiegel nach dem Objekt hingeleitet. Befindet sich zwischen Spiegel und Objekt kein weiterer Apparat, so können die Oeffnungswinkel der beleuchtenden Büschel eine durch die Größe des Spiegels und durch seine Entfernung vom Objekt bestimmte Grenze nicht überschreiten. Dabei ist es ganz gleichgültig, ob der Spiegel eben oder gekrümmt ist. Um das Maximum des möglichen Oeffnungswinkels zu erreichen, muß allerdings bei einem ebenen Spiegel eine ausgedehntere Lichtquelle zur Verfügung stehen, als bei einem Hohlspiegel. Soll mit Büscheln geringerer Oeffnung beleuchtet werden, so müssen geeignete Blenden zwischen Spiegel und Objekt eingeschaltet werden. Soll schiefe Beleuchtung angewandt werden, so muß der Spiegel aus der Achse des Mikroskops herausbewegt werden.

Die Beleuchtung mit Spiegel allein wird jetzt nur noch an den kleineren Mikroskopen benutzt, oder wenn es sich darum handelt, ausgedehnte Objekte mit ganz schwachen Vergrößerungen zu betrachten. Etwa nötig werdende Abblendungen werden durch sogenannte Scheiben- und Zylinderblenden vorgenommen, die an der Unterseite der Objektische angebracht werden können. Bei allen größeren Mikroskopen schaltet man jetzt zwischen Spiegel und Objektebene Linsensysteme besonderer Konstruktion, Kondensoren, ein. Dadurch wird es möglich, die Oeffnungswinkel der Beleuchtungsbüschel beliebig zu vergrößern, selbst bis zum Maximum von fast 180°. Figur 2 zeigt, wie nun entweder das ganze Büschel (a) oder jedes Teilbüschel von beliebiger Oeffnung, Neigung und Richtung (b und c) durch einen geeigneten Blendenapparat herausgeschnitten und zur Beleuchtung verwendet werden kann. Dies ist das Prinzip des Abbeschen Beleuchtungsapparates.

Die mechanische Einrichtung des Apparates ist so beschaffen, daß verschiedene Kondensorsysteme dicht unterhalb der Objektebene eingeschaltet werden können. Der Oeffnungswinkel der beleuchtenden Büschel wird durch eine Irisblende geregelt, die dem sogenannten Diaphragmenträger aufsitzt. Die Mitte der Blende kann beliebig exzentrisch (Fig. 2c) gestellt und außerdem um die Achse des Mikroskops gedreht werden. Von der Wirkung des Apparats überzeugt man sich am besten dadurch, daß man nach Einstellung auf das Objekt das Okular

aus dem Tubus nimmt und mit freiem Auge auf das Objektiv herabblickt. Man sieht dann ein Bildchen der Irisblendenöffnung, das vom Kondensor und Objektiv entworfen wird, und an dessen Größe und Lage man sofort die Art der Beleuchtung erkennen kann. Da in vielen Fällen das mikroskopische Bild wesentliche Verschiedenheiten zeigt, wenn die Beleuchtung verändert wird, so ist es dringend zu empfehlen, daß man sich stets in dieser einfachen Weise über die wirksame Beleuchtung Klarheit verschafft.

genügend großes Bild der eigentlichen Lichtquelle in der Nähe des Diaphragmenträgers des Beleuchtungsapparates entwirft. Eine solche Linse nennt man nach dem Vorgang von A. Köhler einen Kollektor. Die mit dem Kollektor vereinigte Irisblende muß in einer ganz bestimmten Entfernung vom Mikroskop stehen, damit ein Bild ihrer Oeffnung durch die Linsen des Kondensors in der Objektebene entworfen werden kann. Auf diese Weise ist es erstens möglich, das Sehfeld gleichmäßig hell zu beleuchten und zweitens die Ausdehnung dieses

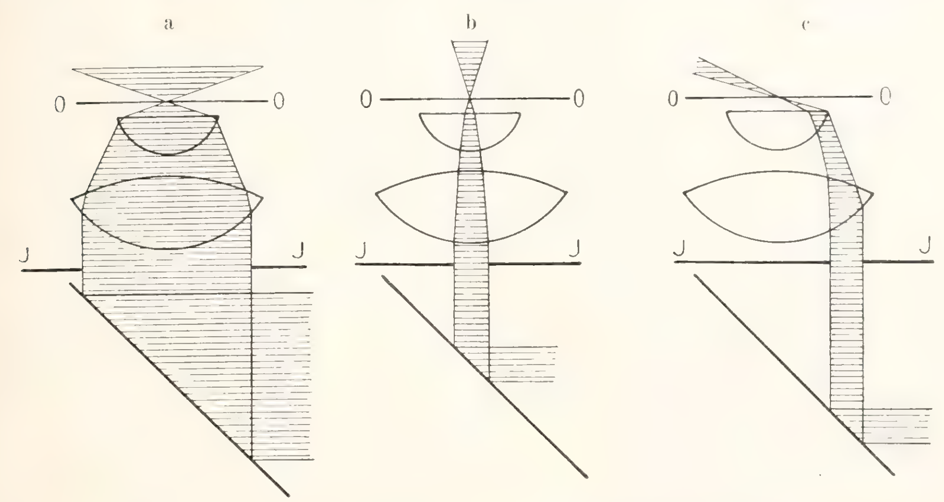


Fig. 2. O—O Objektebene. J—J Ebene der Irisblende.

Außer der Beleuchtungsstärke an den einzelnen Objektpunkten ist nun noch von Wichtigkeit, welche Ausdehnung das erleuchtete Sehfeld hat. Bei der Beobachtung im Mikroskop soll das ganze Sehfeld möglichst gleichmäßig hell sein. Bei starken Vergrößerungen ist das Sehfeld nur klein, die Ausdehnung der erleuchteten Fläche braucht deshalb ebenfalls nur gering zu sein; bei schwachen Vergrößerungen ist das Sehfeld im allgemeinen bedeutend größer und es muß deshalb auch eine größere Fläche gleichmäßig hell sein. Es ist zwar aus bestimmten Gründen erwünscht und in manchen Fällen sogar notwendig, daß nur das eigentliche Sehfeld erleuchtet wird und die Umgebung dunkel bleibt, doch läßt sich das nur erreichen, wenn man das reelle Bild einer hellen Fläche in der Objektebene erzeugen und außerdem die Ausdehnung dieser Fläche beliebig verändern kann.

Bei der gebräuchlichen Konstruktion des Abbeschen Beleuchtungsapparates ist dies möglich, wenn vor dem Mikroskop eine größere Irisblende angebracht wird, durch deren Oeffnen und Schließen der Durchmesser der hellen Fläche im Sehfeld innerhalb weiter Grenzen beliebig verändert werden kann. Diese Irisblende wird am besten mit einer größeren Beleuchtungslinse kombiniert, die so beschaffen ist, daß sie ein Feldes ganz entsprechend den angewandten Vergrößerungen zu wählen.

1c) **Beleuchtung mit auffallendem Licht.** Die mikroskopische Untersuchung undurchsichtiger Objekte, wie Metalle, Mineralien u. dgl. erfordert Beleuchtung mit auffallendem Licht. Bei ganz schwachen Vergrößerungen ist meist zwischen Objekt und Objektiv ein großer Zwischenraum vorhanden, so daß das Objekt direkt von einer geeigneten Lichtquelle bestrahlt werden kann; auch kann meist in diesen Fällen die Beleuchtungsstärke noch durch eine passende zwischen Lichtquelle und Objekt aufgestellte Sammellinse erhöht werden. Bei Beobachtung mit stärkeren Objektiven ist ein solches Verfahren wegen des sehr geringen freien Objektabstandes nicht anwendbar. Man benutzt in diesen Fällen die Linsen des abbildenden Objektivs zugleich als Kondensor. Die von einer seitlich aufgestellten Lichtquelle ausgehenden Beleuchtungsbüschel werden an einer über dem Objektiv angebrachten reflektierenden Planfläche durch die Linsen des Objektivs nach dem Objekt geleitet. Für die Stärke der Beleuchtung ist natürlich auch hier die Leuchtkraft der Lichtquelle und der Oeffnungswinkel der die Objektpunkte treffenden Strahlenkegel maßgebend.

Da das Objektiv selbst als Kondensor dient, so können die beleuchtenden Büschel im günstigsten Falle denselben Oeffnungswinkel erhalten wie die abbildenden Büschel, denn das Objektiv kann mit seinem ganzen Oeffnungswinkel für die Beleuchtung wie für die Abbildung wirksam gemacht werden. Um diese Art der Beleuchtung zu erzielen, benutzt man die sogenannten Vertikalilluminatoren. Es gibt verschiedene Konstruktionen dieser Apparate, von denen hier nur die zwei wichtigsten kurz besprochen werden sollen. Man kann zur Reflexion sowohl totalreflektierende Prismen als auch durchsichtige Plangläser verwenden, die in einem kleinen Zwischenstück zwischen Objektiv und unterem Tubusrand eingeschaltet werden (Fig. 3). Die Objektive müssen

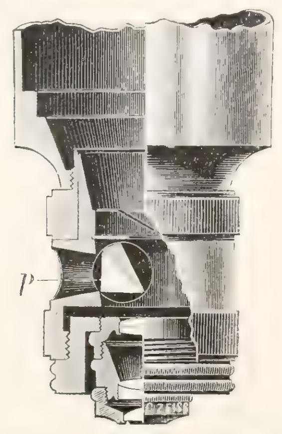


Fig. 3. p Reflexionsprisma.

dabei stets so gefaßt sein, daß die oberste Linse dicht an die spiegelnde Fläche herangebracht werden kann. Diese „kurze Fassung" der Objektive ist dringend nötig, um gewisse sehr störende Reflexe möglichst zu vermeiden. Bei Trockensystemen ist außerdem die Verwendung von Deckgläsern auf den Präparaten zu unterlassen, da auch an diesen starke Reflexe zustande kommen, die eine Verschleierung der Bilder herbeiführen. Demgemäß müssen die benutzten Objektive nicht bloß kurz gefaßt sein, sondern auch für die Benutzung ohne Deckglas korrigiert werden, wenigstens sofern die Größe ihrer Apertur eine Empfindlichkeit gegen die Deckglasdicke bedingt. Homogene Oelimmersionen können dagegen auch mit Deckgläsern verwendet werden, da in diesem Falle die Reflexe an der Oberfläche des Deckglases unterbleiben.

Bei Verwendung eines totalreflektierenden Prismas — Vertikalilluminator nach Nachet (Fig. 3) — wird durch dieses die halbe Oeffnung des Objektivs bedeckt. Für die Beleuchtung wie für die Abbildung kommt somit nur je die Hälfte der Apertur des Objektivs zur Wirkung, und außerdem ist die Achse der beleuchtenden wie der abbildenden Büschel gegen die Mikroskopachse geneigt, es ist also schiefe Beleuchtung vorhanden. Wird dagegen als reflektierende Fläche eine plane Glasplatte benutzt, so bleibt für Beleuchtung und Abbildung die ganze Apertur des Objektivs wirksam und es ist stets gerade oder zentrale Beleuchtung vorhanden. Diese Form des Apparates — Vertikalilluminator nach Beck — ist deshalb vorzuziehen, wenn das Auflösungsvermögen des Objektivs voll ausgenutzt werden soll. Andererseits haben die Plattenilluminatoren den Nachteil, daß durch sie die Intensität der Beleuchtung beträchtlich vermindert wird, da ein Teil des auf die reflektierende Platte fallenden Lichtes durch sie hindurchgeht und somit für die Beleuchtung des Objekts unwirksam wird. Bei den Prismenilluminatoren ist das Auflösungsvermögen zwar geringer, aber die Bilder sind kontrastreicher.

Bei den Arbeiten mit Vertikalilluminatoren ist es besonders wichtig, nur so viel von der Oberfläche des Objekts zu beleuchten, wie abgebildet werden soll, also nur das für die jeweilige Vergrößerung in Betracht kommende Sehfeld. Wird eine größere Fläche beleuchtet, so tritt stets eine beträchtliche Verschleierung der Bilder infolge von störenden Reflexen ein. Es ist also notwendig, hierbei in der schon beschriebenen Weise zu verfahren, nämlich ein Kollektorsystem mit Irisblende in einer Entfernung von etwa 160 mm vom Tubus aufzustellen, durch das ein Bild der Lichtquelle in der Nähe der reflektierenden Fläche über dem Objektiv entworfen wird. Ein verkleinertes Bild der Irisblende wird dann durch das Objektiv in der Objektebene erzeugt und der Durchmesser dieses Bildchens läßt sich beliebig verändern. Durch eine zweite Irisblende, die in der Nähe der reflektierenden Fläche angebracht werden kann, läßt sich ganz ähnlich wie durch die Irisblende des Abbeschen Beleuchtungsapparats der Oeffnungswinkel der beleuchtenden Büschel und somit auch die Stärke der Beleuchtung auf dem Objekt verändern.

Ueber die Beleuchtungseinrichtungen für besondere Zwecke vgl. die Abschnitte: „Spektralapparate", „Polarisationseinrichtungen", „Mikrophotographie und Projektion", „Dunkelfeldbeleuchtung und Ultramikroskopie".

2. Objektive und Okulare. 2a) Objektive. Zur Kennzeichnung eines Objektivs dienen die Angaben über seine Aequivalentbrennweite und seine numerische Apertur.

Aus der Brennweite läßt sich sofort die Vergrößerung des Systems bestimmen, und die numerische Apertur gibt das Maß für das Auflösungsvermögen und die Lichtstärke. Die lineare Vergrößerung ist stets umgekehrt proportional der Brennweite, das Auflösungsvermögen wächst direkt proportional der numerischen Apertur und die Helligkeit

der Bilder nimmt bei sonst gleichen Verhältnissen proportional dem Quadrat der numerischen Apertur zu.

Bezeichnet u den halben Oeffnungswinkel des Objektivs, n den Brechungsexponenten des Mediums (Fig. 4), in dem dieser Winkel verläuft, und a die numerische Apertur, so gilt die Gleichung

$$a = n \sin u.$$

Der Wert für a ist also eine Zahl, die je nach dem Wert von n auch größer als 1 werden kann. Bei Trockensystemen muß a immer kleiner als die Einheit bleiben; bei Immersionssystemen kann a beträchtlich größer werden. Die bei den jetzt gebräuchlichen Objektiven vorhandenen Grenzen sind etwa folgende: bei Trockensystemen 0,95, bei Wasserimmersionen 1,25 und bei homogenen Immersionen 1,40.

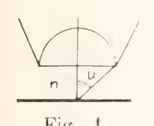
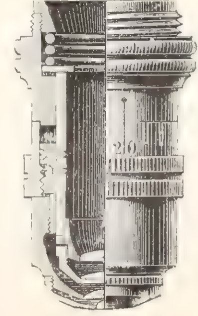


Fig. 4.

Es sind zwar mehrere Versuche gemacht worden, durch Anwendung anderer Immersionsflüssigkeiten den Wert von a noch weiter zu steigern, so wurde 1889 von Abbe eine Monobromnaphthalin-Immersion konstruiert, bei der die numerische Apertur bis auf 1,6 erhöht werden konnte, da der Berechnungsexponent des Monobromnaphthalins 1,66 beträgt. Dieses System war zwar keine „homogene" Immersion, denn der Brechungsexponent des Glases, aus dem Frontlinse und Deckgläser hergestellt wurden, war etwas höher, 1,72, aber der Korrektionszustand kam fast dem eines Apochromaten nahe. Für die praktische Verwendung dieser Objektive ergaben sich jedoch so beträchtliche Schwierigkeiten, daß die regelmäßige Herstellung schon bald wieder aufgegeben wurde. Für die subjektive Beobachtung ist somit a=1,40 zurzeit die praktisch erreichbare äußerste Grenze. Bedeutend weiter läßt sich die Grenze für das Auflösungsvermögen hinausschieben, wenn zur Abbildung nicht das sichtbare Licht, sondern ultraviolette Strahlen von sehr kurzer Wellenlänge verwendet werden. Allerdings können dann die Bilder nicht mehr vom Auge wahrgenommen werden, sondern an die Stelle der Augennetzhaut muß die photographische Platte treten. Näheres hierüber siehe in dem Abschnitt 5.

Aus praktischen Gründen werden gewöhnlich drei Gruppen von Objektivsystemen unterschieden: schwache, mittlere und starke. Unter schwachen versteht man solche, deren Brennweite nicht unter etwa 15 mm herabgeht, und deren numerische Apertur 0,30 nicht übersteigt; die mittleren umfassen die Brennweiten von etwa 4 mm bis 15 mm und die Aperturen von 0,30 bis etwa 0,65, die starken die Brennweiten von 4 mm und weniger und die Aperturen über 0,65. Die Objektive der ersten Gruppe sind gegen Veränderungen in der Deckglasdicke und der Tubuslänge nahezu unempfindlich; in der zweiten Gruppe macht sich eine solche Empfindlichkeit schon recht bemerkbar und in der dritten Gruppe ist sie so stark, daß schon geringe Abweichungen von der vorgeschriebenen Deckglasdicke und Tubuslänge eine sehr beträchtliche Verminderung in der Bildschärfe herbeiführen. Allerdings gehören gerade zu den stärksten Objektiven auch solche, die selbst bei sehr verschiedener Deckglasdicke gleichmäßig gute Bilder geben. Es sind dies die homogenen Immersionen, bei denen die Immersionsflüssigkeit für eine mittlere Farbe denselben Brechungsexponenten hat wie das Glas der Frontlinse und das Deckglas. Infolgedessen findet vom Objekt bis zur halbkugeligen hinteren Fläche der Frontlinse keine Ablenkung der abbildenden Büschel statt. Die homogenen Immersionen können deshalb auch ganz gut ohne Deckglas benutzt werden, was bei manchen Untersuchungen sogar sehr erwünscht ist. Am empfindlichsten gegen Veränderungen in der Dicke der Deckgläser sind die Trockensysteme und die Wasserimmersionen von hoher Apertur. Geringe Unterschiede lassen sich durch Veränderung der Tubuslänge ausgleichen, indem man bei zu dickem Deckglas den Tubus verkürzt und bei zu dünnem verlängert. Für größere Unterschiede reicht jedoch diese Methode nicht mehr aus; es wird dann nötig, innerhalb der Objektive selbst Aenderungen in dem Abstand zweier Linsengruppen des Systems vorzunehmen. Dazu dienen die sogenannten Korrektionsfassungen. Durch Drehung eines an der Fassung des Systems angebrachten Ringes kann die Distanzänderung vorgenommen werden, und die an einer Teilung ablesbare Stellung des Ringes gibt die Deckglasdicke an, für die das Objektiv jeweils korrigiert ist (Fig. 5). In der Regel lassen die Korrektionsfassungen eine Einstellung für Dicken von 0,1 bis 0,2 mm zu.


Fig. 5.

Die richtige Handhabung dieser Einrichtungen ist für die Bildschärfe von größter Wichtigkeit. Sehr oft wird die Leistungsfähigkeit solcher Systeme mit Unrecht unterschätzt, weil viele Mikroskopiker über die Einwirkung der Deckglasdicke und die Handhabung der Korrektionseinrichtungen nicht genügend unterrichtet sind. Es ist hierin auch wohl der Grund dafür zu suchen, daß sich die homogenen Immersionen so großer Beliebtheit erfreuen, selbst für Untersuchungen, für die die Benutzung dieser teuren Systeme gar nicht notwendig wäre. Ihre Unempfindlichkeit gegen die Deckglasdicke ermöglicht allerdings ein bequemeres Arbeiten, aber

solange es sich nicht um Auflösung feinster Struktureinzelheiten handelt, können für sehr viele Untersuchungen auch gute Trockensysteme von hoher Apertur mit Vorteil benutzt werden, wenn nur eine richtige Handhabung der Korrektionseinrichtungen oder eine sorgfältige Auswahl der Deckgläser stattfindet.

Nach dem Korrektionszustande sind die Mikroskopobjektive in zwei Gruppen zu teilen: in Achromate und Apochromate. Bis zum Jahre 1886 waren nur achromatische Objektive im Gebrauch. Bei ihnen ist die Korrektion der sphärischen Aberration für eine mittlere Farbe und die der chromatischen für zwei Farben, allerdings nur für einen mittleren Teil der Oeffnung, erzielt. Diese Art der Korrektion gibt gute Bilder, aber die Konturen können bei schiefer Beleuchtung oder bei weitgeöffnetem Beleuchtungskegel nicht völlig farbenrein sein. Es treten noch violette und grünlichgelbe Säume auf, die man gegenüber anderen Farben, wie blau, gelb, rot, als sekundäre Farben bezeichnet. Treten bei einseitig schiefer Beleuchtung diese sekundären Farben rein und als schmale Säume auf und fehlen außerdem Verschleierungen des Bildes, so ist der Korrektionszustand so gut, wie er eben bei einem achromatischen Objektiv verlangt werden kann.

Aus den theoretischen Untersuchungen Abbes und auch aus praktischen Versuchen mit sogenannten Endomersionsobjektiven — Objektivsystemen mit Flüssigkeitslinsen — konnte geschlossen werden, daß bei Benutzung anderer Materialien für die Linsen auch die noch vorhandenen Farbenfehler beseitigt und zugleich die sphärische Korrektion für mindestens zwei Farben durchgeführt werden könne. Durch die Herstellung zahlreicher neuer Glassorten in dem auf Anregung von Abbe gegründeten Schottschen Glaswerk, sowie durch Einführung von Linsen aus anderem Material, z. B. Fluorit, wurde es möglich, vom Jahre 1886 ab einen neuen Typus von Mikroskopobjektiven zu liefern, bei dem die chromatische Aberration für drei Farben beseitigt war. Wegen des wesentlich höheren Grades der Farbenvereinigung war es ganz gerechtfertigt, für die neuen Systeme eine andere Bezeichnung, nämlich Apochromate, zu wählen. Sie haben einen bedeutend komplizierteren Aufbau, als die in der Brennweite entsprechenden Achromate. Man kann die eben dargelegten optischen Unterschiede zwischen den Achromaten und Apochromaten zwar an jedem guten mikroskopischen Präparate erkennen; sie treten aber noch viel schärfer hervor, wenn man die Vergleichung an einem künstlichen Präparat, der Testplatte nach Abbe, ausführt. Das eigentliche Prüfungsobjekt sind Linien, die in einen Silberbelag eingerissen und mit verschieden dicken Deckgläsern bedeckt werden. Bei der früheren Form der Testplatte waren auf einem Objektträger 6 Deckgläschen von verschiedener Dicke aufgekittet, bei der neueren Form ist nur ein schmaler Glasstreifen von keilförmiger Gestalt aufgekittet, dessen Dicke von etwa 0,08 bis 0,23 mm ansteigt. Die Unterseite dieses Keils trägt den Silberbelag, in dem die ziemlich groben Linien eingerissen sind. Die Testplatte dient jedoch nicht bloß dazu, die Vergleichung von Achromaten und Apochromaten vorzunehmen, sondern sie gibt ganz allgemein die Möglichkeit, über alle Einzelheiten des Korrektionszustands eines beliebigen Mikroskopobjektivs Klarheit zu erhalten; und es läßt sich an den Bildern der Silberlinien zugleich feststellen, für welche Deckglasdicke das System korrigiert ist.

Wenn auch hier nicht auf alle Erscheinungen hingewiesen werden kann, die bei einer sorgfältigen Prüfung zu beachten sind, so soll doch wenigstens kurz auf die wichtigsten Kriterien der Prüfung aufmerksam gemacht werden. Es wird zunächst bei engem zentralen Beleuchtungsbüschel auf die Konturen der Linien scharf eingestellt, sodann wird ohne Aenderung der Einstellung von der zentralen zur schiefen Beleuchtung übergegangen. Während dieses Ueberganges bleiben bei jedem sphärisch gut korrigierten System die Ränder der Linien im Bilde ganz scharf, bei den Achromaten zeigen sich jedoch im schiefen Lichte die schon erwähnten schmalen Säume in den sekundären Farben violett und grüngelb, bei den Apochromaten bleiben die Konturen wenigstens in der Mitte des Sehfeldes auch bei schiefem Licht vollständig farbenrein. Dies gilt allerdings nur, wenn bei der Beobachtung die vorgeschriebene Deckglasdicke und Tubuslänge eingehalten wird. Ist dies nicht der Fall, so wird noch eine mehr oder weniger starke Verschleierung der Ränder sich bemerkbar machen. Diese Verschleierung läßt erkennen, daß die sphärische Korrektion durch die abweichende Deckglasdicke oder Tubuslänge gestört worden ist, daß also ein an sich gut korrigiertes System durch die Abweichungen in Deckglasdicke und Tubuslänge in seiner Leistungsfähigkeit so herabgesetzt worden ist, als wenn ein nicht gut korrigiertes System benutzt worden wäre. Ist unter diesen Umständen die Beleuchtung nicht bloß einseitig, sondern allseitig schief, indem bei zentraler Stellung die Irisblende des Beleuchtungsapparates weit geöffnet wird, so kann bei keiner Einstellung ein scharfes Bild entstehen, alle Konturen erscheinen dann stark verschleiert und meist auch noch mit verwaschenen farbigen Säumen. Besonders bei den starken Trockensystemen mit den numerischen Aperturen von 0,85 bis 0,95 kann man sich sehr leicht überzeugen, wie stark die Verschlechterung in der Schärfe der Bilder ist, wenn von der vorgeschriebenen Deckglasdicke und Tubuslänge abgewichen wird; und man kann andererseits erkennen, wie bei richtiger Tubuslänge und Deckglasdicke oder

bei sachgemäßer Handhabung der Korrektionseinrichtungen auch bei schiefster Beleuchtung oder bei voller Oeffnung der Irisblende alle Konturen scharf abgebildet erscheinen.

Ein zweiter wichtiger Apparat für die Prüfung der Objektive ist das gleichfalls von Abbe konstruierte Apertometer (Fig. 6). Um dies bequem bewerkstelligen zu können, ist auf der Oberfläche des Apertometers ein kleiner kreisförmiger Silberbelag (a) angebracht, auf dessen zentrale Oeffnung einzustellen ist. In der Ebene der schon erwähnten Blende über dem Apertometersystem kommt das Bild dieser Oeffnung zustande; und so wird durch diese

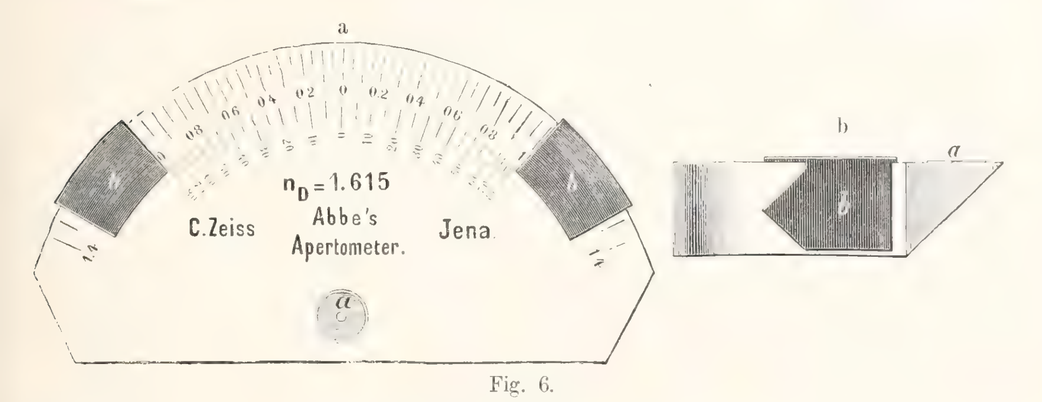


Fig. 6.

Es besteht aus einer halbzylindrischen Glasscheibe, die auf den Objekttisch gelegt wird. Auf der einen Seite ist unter einem Winkel von 45° gegen die Zylinderachse eine reflektierende Fläche angeschliffen; auf den Zylindermantel werden zwei mit Spitzen versehene Metallplättchen (b) als Signale für die Messung der Apertur verschoben. Die von diesen Spitzen aus zu verfolgenden Strahlenrichtungen werden an jener geneigten Fläche so reflektiert, daß sie in das Objektiv eintreten können und in der Nähe der hinteren Brennebene Bilder der Metallspitzen erzeugen. Man betrachtet diese Bilder am besten mittels eines Hilfsmikroskops, dessen Objektiv durch ein ganz schwaches an den Auszugtubus angeschraubtes System gebildet wird. Dieses sogenannte Apertometersystem ist nach dem Okular zu mit einer engen zentralen Blende versehen, die bewirkt, daß nur die durch die Mitte des Sehfeldes hindurchgehenden Strahlenbüschel bei der Abbildung der Signale wirksam werden. Verschiebt man die Metallplättchen nun so weit, daß die Bilder der Spitzen gerade am Rande der Objektiv-Oeffnung verschwinden, so wird durch die Lage der Plättchen auf der Apertometerscheibe der Verlauf der eben noch in das Objektiv eintretenden Randstrahlen gekennzeichnet, und man kann dann an der äußeren Teilung direkt den Wert der numerischen Apertur ablesen. Vor der Ausführung der Messung muß das Objektiv, dessen Apertur bestimmt werden soll, zunächst auf das Zentrum des Zylinders eingestellt werden, als wenn ein gewöhnliches mikroskopisches Präparat vorläge; um dies bequem bewerk-

Blende bewirkt, daß in der Tat nur der Oeffnungswinkel gemessen wird, dessen Scheitel in der Mikroskopachse liegt; entfernt man die Blende des Apertometersystems, so können die gemessenen Werte zu groß ausfallen.

Aus der Abbeschen Theorie der mikroskopischen Bilderzeugung ergibt sich, wie schon erwähnt wurde, daß das Auflösungsvermögen der Objektive in bestimmter Beziehung zu deren numerischer Apertur steht, diese Beziehung läßt sich kurz ausdrücken durch die Gleichung $\delta = \frac{\lambda}{2a}$, worin δ die kleinste noch eben auflösbare Distanz zwischen zwei Strukturelementen, λ die Wellenlänge des zur Beobachtung verwandten Lichtes und a die numerische Apertur des Objektivs ist. Bei der großen Bedeutung, die hiernach die numerische Apertur für die Leistungsfähigkeit eines Objektivs besitzt, ist es dringend zu empfehlen, daß die praktischen Mikroskopiker sich mit der eben geschilderten Meßmethode vertraut machen, damit sie jederzeit in der Lage sind, die von den optischen Werkstätten gemachten Angaben über die numerischen Aperturen nachzuprüfen.

2b) Okulare. Die gewöhnlichen Okulare, die in Verbindung mit den achromatischen Objektiven benutzt werden, sind nach dem Huygensschen Typus gebaut; sie bestehen aus zwei einfachen unachromatischen Linsen, von denen die obere als Augenlinse und die untere, dem Objektiv zugekehrte, als Kollektivlinse oder kurz als Kollektiv bezeichnet wird. Für den Abstand der beiden

Linsen besteht allerdings eine gewisse Regel, die aber keineswegs genau eingehalten zu werden braucht. Der vordere Brennpunkt ist bei den Huygensschen Okularen virtuell und liegt zwischen den beiden Linsen, etwas über der Sehfeldblende, die ebenfalls zwischen den Linsen angebracht sein muß. Einen weiteren einfachen Okulartypus, der aber nur bei einigen Meßokularen angewandt wird, stellen die Ramsdenschen Okulare dar, die auch nur aus zwei einfachen unachromatischen Linsen bestehen. Ihr vorderer Brennpunkt ist reell und liegt unterhalb der Kollektivlinse; auch die Sehfeldblende befindet sich infolgedessen vor dieser Linse. Außerdem werden noch einige andere Formen von Okularen hergestellt, die als orthoskopische, periskopische, aplanatische usw. bezeichnet werden, die aber hier unberücksichtigt bleiben können, da sie für die praktische Mikroskopie kaum eine Bedeutung besitzen. Dagegen ist seit der Konstruktion der Apochromate ein neuer Typus, die Kompensationsokulare, eingeführt worden, der einen wichtigen Fortschritt in der Mikroskopie darstellt.

Bei allen stärkeren Objektiven, und zwar sowohl bei den Achromaten wie bei den Apochromaten, kommt ein Farbenfehler vor, der sich aber in der Mitte der Bilder kaum bemerkbar macht. Es sind nämlich die Brennweiten für rote und blaue Strahlen nicht ganz gleich, und so kommt es, daß das blaue Bild etwas größer ist als das rote, was in den Randpartien der Bilder zu erkennen ist. Dieser Fehler, die sogenannte chromatische Differenz der Vergrößerung, läßt sich nun dadurch aufheben, daß man den Okularen den entgegengesetzten Fehler gibt, ihn also „kompensiert". Dies ist bei den Kompensationsokularen geschehen. Die gewöhnlichen Okulare heben diesen Fehler nicht auf. Der Unterschied beider Okularformen ist leicht zu erkennen, wenn man durch die Okulare nach einer hellen Fläche sieht; man bemerkt dann, daß der Rand der Sehfeldblende bei den Huygensschen Okularen blau, bei den Kompensationsokularen orangerot erscheint.

Dieser stark hervortretende Farbenrand ist also nicht etwa ein Konstruktionsfehler, sondern die Korrektion ist absichtlich so getroffen worden, daß bei den Kompensationsokularen das rote Bild größer wird als das blaue. Weil eine solche bestimmte Forderung, also ein ganz bestimmter Betrag der Farbenfehler, bei den Kompensationsokularen gestellt werden mußte, so ist auch deren Aufbau ein wesentlich komplizierterer als der der Huygensschen Okulare.

Bei den schwächeren Objektiven kann der Fehler der chromatischen Differenz der Vergrößerung leicht vermieden werden, und er ist auch in den gut konstruierten Achromaten von geringer numerischer Apertur nicht vorhanden. Es wäre auch nicht nötig gewesen, daß die schwächeren Apochromate diesen Fehler zeigten; Abbe hat aber, um die ganze Reihe der Apochromate mit den Kompensationsokularen verwendbar zu machen, auch den schwächeren Systemen diesen Fehler in bestimmtem Betrag verliehen, so daß sie ebenfalls in den Randpartien der Bilder möglichst farbenreine Bilder geben. Hieraus ergibt sich, daß sämtliche Apochromate nur mit Kompensationsokularen zu benutzen sind, und ferner, daß die stärkeren Achromate mit den Kompensationsokularen bessere Bilder geben als mit den Huygensschen Okularen, daß es aber ein Fehler wäre, wenn die schwächeren Achromate mit den Kompensationsokularen gebraucht würden, denn es käme dann ein Bildfehler hinzu, der in den Objektiven gar nicht vorhanden ist.

Ueber die für besondere Zwecke bestimmten Okularkonstruktionen, wie Stereoskopokulare, Meßokulare, Spektralokulare vgl. die betreffenden Abschnitte.

3. Mechanische Einrichtungen der Stative. 3a) Einstellvorrichtungen. Man unterscheidet zwei Formen der Einstellung, die grobe und die feine. Die grobe Einstellung dient dazu, das Objektiv dem Objekt rasch so weit zu nähern, daß ein verschwommenes Bild erscheint; die feine Einstellung muß eine sehr langsame und gleichmäßige Bewegung des Tubus ermöglichen, so daß Unterschiede von wenigen Tausendstel Millimetern in der Vertikalverschiebung schon deutlich bemerkbar werden. Die grobe Einstellung wird bei den allermeisten neueren Stativen durch eine Zahn- und Triebbewegung bewirkt. Die ineinandergreifenden Zähne stehen schief zur Bewegungsrichtung, wodurch eine gleichmäßigere Verschiebung bewirkt und der tote Gang leichter vermieden werden kann.

Die feine Einstellung erfolgt stets durch eine Mikrometerschraube. Die ältere Form, die auch jetzt noch viel im Gebrauch ist, beruht auf einer Prismenführung. Prismenachse und Mikroskopachse müssen genau parallel laufen. Allgemein wichtig ist, daß nur ein Kontakt zwischen zwei glasharten Stahlstücken, der Spitze der Mikrometerschraube und der als Widerlager dienenden Platte, besteht, wodurch Feinheit und Gleichmäßigkeit der Bewegung ermöglicht wird. Die neueren Formen der Feinbewegung benutzen dagegen eine Schlittenführung, bei der ebenfalls zwischen dem Tubusträger und der Mikrometerschraube nur ein einziger Kontakt zweier glasharter Stahlstücke besteht. Diese neuere Mikrometerbewegung, übertrifft die ältere Form beträchtlich an Feinheit; sie ist von zu starker einseitiger Belastung befreit und gegen Eingriffe von außen gut geschützt.

Von allen Einstellvorrichtungen ist dringend zu fordern, daß sie stets gleichmäßig funktionsfähig bleiben, mag das Stativ auf-

recht, geneigt oder horizontal stehen, denn bei vielen Beobachtungsmethoden ist es nötig, geneigte oder horizontale Lage des Tubus anzuwenden.

Die Schraubenköpfe der Feinbewegung müssen bei allen größeren und mittleren Stativen mit Teilung versehen sein, damit man die Göße der Vertikalverschiebung genau beurteilen kann. Die Mikrometerschrauben können somit, wenn ihre Schraubengänge ganz gleichmäßig gearbeitet sind und jeder tote Gang vermieden wird, recht gut zu Dickenmessungen benutzt werden. Näheres hierüber siehe unter „Meßapparate".

3b) Tubus. Der Tubus besteht bei allen besseren Mikroskopen aus zwei Rohren, den äußeren Tubus und den sogenannten Auszugtubus. Diese Einrichtung ist notwendig, um stets die richtige Tubuslänge erreichen zu können. Der Auszugtubus muß an seinem unteren Rande das gewöhnliche Systemgewinde tragen, damit man das Apertometersystem oder andere schwache Objektive anschrauben kann, die dann in Verbindung mit einem gewöhnlichen oder einem Meßokular ein Hilfsmikroskop zur Beobachtung der Austrittspupille des Objektivs dienen. Zur Bestimmung der numerischen Aperturen, zur Betrachtung der Achsenbilder, der Beugungsspektren, wie sie durch regelmäßige Strukturen hervorgerufen werden, ferner auch zur Bestimmung der Lage der hinteren Brennpunkte der Objektive ist ein solches Hilfsmikroskop notwendig. Der Auszugtubus soll auf seiner Außenseite eine Millimeterskala tragen, damit jederzeit, auch unter Berücksichtigung etwa eingeschalteter Zwischenstücke, wie Revolver u. dgl. die bestehende Tubuslänge genau abgelesen werden kann.

Wegen besonderer Einrichtungen an den Tuben der Polarisationsmikroskope vergleiche weiter unten.

3c) Wechselvorrichtungen für die Objektive. Es ist sehr wünschenswert, verschiedene Objektive rasch untereinander auswechseln zu können, ohne daß die Einstellung wesentlich geändert zu werden braucht. Es gibt verschiedene Vorrichtungen für diesen Zweck, von denen zwei Formen besonders in Betracht kommen: Revolver und Schlittenwechsler. Bei den Revolvern werden 2, 3 oder auch 4 verschiedene Objektive an einer Scheibe befestigt, die um eine seitlich vom Tubus gelegene Achse so drehbar ist, daß die Objektive nacheinander in dieselbe Lage unter den Tubus gebracht werden können. Diese Vorrichtungen sind zwar sehr bequem und werden deshalb für die gewöhnliche Beobachtung allgemein benutzt, sie haben aber den Nachteil, daß die einzelnen Objektive untereinander niemals so genau zentriert werden können, daß wirklich bei der Drehung immer dieselbe Objektpartie im Sehfeld bleibt. Auch kann die Abgleichung der Objektive für dieselbe Einstellung nur innerhalb gewisser Grenzen ermöglicht werden; und außerdem ist natürlich die Zahl der an demselben Revolver anzuschraubenden Objektive beschränkt. Diese Mängel lassen sich bei den Schlittenwechslern vermeiden. Sie bestehen aus zwei Teilen, den Tubusschlitten und den Objektivschlitten (vgl. Fig. 7). Der Tubusschlitten

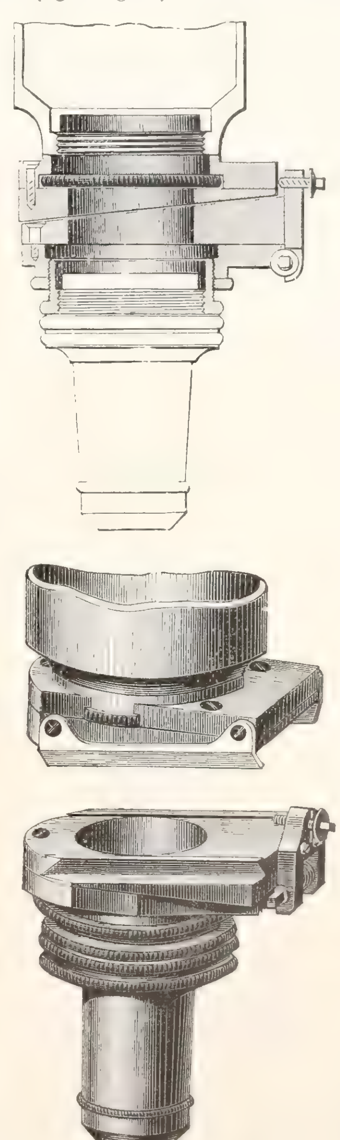


Fig. 7.

wird ähnlich wie die Revolver mit dem Tubus durch Anschrauben fest verbunden; in die etwas schief gestellte Schlittenführung

passen die Objektivschlitten genau hinein. Jedes Objektiv kann nun an dem zugehörigen Objektivschlitten ganz exakt zentriert und für eine bestimmte Einstellung abgeglichen werden. Bei richtiger Handhabung dieser Vorrichtungen können eine größere Anzahl verschiedener Objektive untereinander rasch und sicher ausgewechselt werden, ohne daß die einmal eingestellte Objektpartie aus dem Sehfeld verrückt wird. Die Schlittenwechsler ermöglichen deshalb bei allen feineren Untersuchungen und besonders bei der Photographie und Projektion mikroskopischer Präparate ein viel exakteres Arbeiten, als die Revolver.

3d) Objekttische. Die Dimensionen der Objekttische müssen so beschaffen sein, daß die gebräuchlichen Objektträger eine völlig sichere Lagerung erhalten können. In vielen Fällen ist es erwünscht und auch notwendig, die Tische mit den daraufliegenden Präparaten um die Mikroskopachse zu drehen; die obere Platte des Tisches muß dann drehbar und auch zentrierbar sein, damit stets ein Zusammenfallen der Drehungsachse des Tisches mit der optischen Achse des Mikroskops erreicht werden kann. Ferner ist zur Durchsuchung größerer Präparate, sowie zur Messung längerer Strecken geradlinige Bewegung in zwei zueinander senkrechten Richtungen erwünscht. Objekttische, die solche Bewegungen ermöglichen, werden als Kreuztische bezeichnet und in sehr verschiedenen Konstruktionsformen hergestellt. Bei den besseren Formen sind die Schlittenführungen mit genauen Teilungen versehen, die nicht nur zur Messung von Strecken, sondern auch als sogenannte Findereinrichtungen dienen, indem an ihnen bei bestimmter Lage des Präparats die Koordinaten der einzelnen Objektpunkte festgestellt werden können. Empfehlenswert ist es, die Kreuzschlittenbewegungen mit der Dreh- und Zentriervorrichtung zu vereinigen. Ganz präzise Ausführung aller dieser Bewegungsmechanismen ist dringend erforderlich, denn toter Gang der Schrauben, mangelhafte Schlittenführung oder Schlottern der Drehbewegung machen derartige Tische so gut wie unbrauchbar.

4. **Nebenapparate.** 4a) Zeichenapparate. Der Zweck der Zeichenapparate ist, das mikroskopische Bild und das Bild des Zeichenstiftes so übereinanderzulagern, daß die Konturen des mikroskopischen Bildes mit Leichtigkeit nachgezeichnet werden können. Bei den meisten der jetzt gebräuchlichen Zeichenapparate wird das mikroskopische Bild vom Auge direkt und das Bild des Zeichenstiftes nach zweimaliger Reflexion gesehen. Erwünscht ist es, daß man den Apparat leicht an dem Tubus anbringen kann und bei Unterbrechung des Zeichnens auch bequem zur Seite schlagen kann. Es genügt, wenn nur der über dem Okular befindliche Teil zeitweise entfernt wird und wenn dafür gesorgt ist, daß er später wieder in genau dieselbe Lage zurückgebracht werden kann, damit beim Wiederbeginnen des Zeichnens nicht jedesmal eine neue Justierung notwendig wird. Diese Forderungen werden von den Zeichenapparaten nach Abbe (vgl. Fig. 8) erfüllt. Ueber dem Okular befindet sich ein aus zwei gleichschenkeligen rechtwinkeligen Prismen zusammengesetztes Glaswürfelchen,

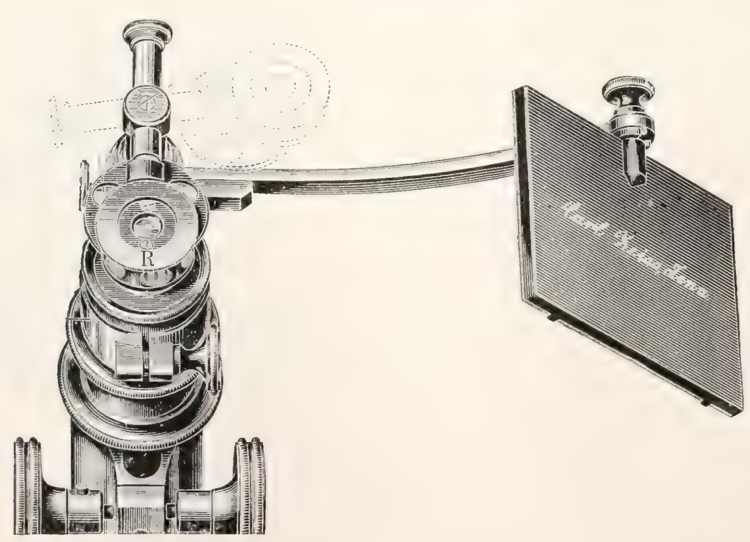


Fig. 8.

durch das das Auge nach dem mikroskopischen Bilde blickt. Die Hypotenusenfläche des einen Teilprismas ist versilbert und in der Mitte der Silberschicht ist eine Oeffnung ausgekratzt, die konzentrisch mit der Austrittspupille des Mikroskops liegen muß. Durch eine Zentriervorrichtung kann diese Lage stets leicht erreicht werden. Um parallaktische Verschiebungen zu vermeiden, ist es erwünscht, daß jene Oeffnung in der Versilberung in dieselbe Höhe wie die Austrittspupille zu liegen kommt, was durch Vertikalverschiebung des Apparates ermöglicht wird. Ferner sind Einrichtungen vorhanden, die gestatten, die Helligkeiten des mikroskopischen Bildes und des Bildes der Zeichenfläche gegeneinander abzustimmen; denn das Zeichnen wird bedeutend erschwert, wenn zu große Verschiedenheiten in der Helligkeit der beiden Flächen bestehen. Durch Einschaltung einer Reihe von Rauchgläsern sowohl zwischen dem Würfelchen und dem Okular wie zwischen dem Würfelchen und dem Spiegel läßt sich jede wünschenswerte Abstufung der Helligkeiten erzielen.

4b) Meß- und Zählapparate. *α*) Meßapparate. Messungen an mikroskopischen Objekten können vorgenommen werden, indem man zunächst Zeichnungen unter genau bekannter Vergrößerung ausführt und an ihnen die Maße bestimmt. Voraussetzung für die Richtigkeit der Messungen ist dabei, daß die Zeichnungen nicht verzerrt sind. Doch wird man dieses etwas umständliche Verfahren nur selten benutzen. Die gewöhnliche Methode der Messung ist die mittels Okularmikrometer. Die einfachere Form besteht aus einem Glasplättchen mit eingeritzter Skala, das auf die Sehfeldblende des Okulars gelegt wird. Die Messung wird also an dem in der Blendenebene entstehenden reellen Bild des Objekts vorgenommen. Wünschenswert ist es, daß die Augenlinse der hierzu benutzten Okulare verstellbar eingerichtet wird (sogenannte Meßokulare), damit für verschiedene Sehweiten auf die Ebene der Skala genau eingestellt werden kann. Die Werte der einzelnen Skalenintervalle müssen für jede Kombination von Objektiv und Okular mittels eines genau bekannten als Objekt benutzten Maßstabs (Objektmikrometer) bestimmt werden.

Die Tabellen, die gewöhnlich den Mikroskopen beigegeben werden, können selbst im besten Falle nur angenäherte Zahlen enthalten, denn schon kleine Verschiedenheiten in den Brennweiten der Linsensysteme rufen beträchtliche Verschiedenheiten in jenen Werten hervor. Für Objektive mit Korrektionsfassung sind die Intervallenwerte bei den einzelnen Stellungen der Schraube verschieden, da durch die Drehung der Schraube die Brennweite geändert wird. Bei Messungen mit solchen Objektiven ist also stets auf die Stellung der Schraube zu achten. Daß ferner bei allen derartigen Messungen diejenige Tubuslänge genau eingehalten werden muß, für die die Eichung der Intervalle ausgeführt wurde, ist ohne weiteres einleuchtend.

Für feinere Messungen benutzt man statt der gewöhnlichen Okularmikrometer die Okularschraubenmikrometer, die so eingerichtet sind, daß in der Sehfeldblende ein Strichkreuz als Signal mittels einer feinen Mikrometerschraube verschoben wird. Der Kopf dieser Schraube ist als Trommel ausgebildet und trägt eine Teilung, deren Intervalle ebenfalls genau geeicht werden müssen. Die Okularschraubenmikrometer haben den Vorteil, daß man das Signal sehr scharf an die Endpunkte der zu messenden Strecke anlegen kann, während man bei den gewöhnlichen Okularmikrometern meist auf Schätzung angewiesen ist.

Für die Messung größerer Strecken reichen allerdings diese Mikrometer nicht aus; man muß dann die mit Teilungen versehenen Schlittenführungen der Kreuztische oder besonders gebaute Objektschraubenmikrometer zu Hilfe nehmen.

Ausmessung von Flächen geschieht am besten mit Okularnetzmikrometern, Glasplättchen, auf denen ein feines Netz eingeritzt ist; auch bei diesen muß natürlich der Wert eines einzelnen Quadrats erst durch Vergleichung mit einem Objektmikrometer bestimmt werden.

Dickenmessungen können mittels der Mikrometerschraube des Mikroskops erfolgen. Bei allen größeren Stativen trägt der Kopf dieser Schraube eine Teilung, die die Verschiebung des Tubus bei verschiedener Einstellung an einem Index abzulesen gestattet. Doch ist dabei zu beachten, daß die abgelesene Dicke keineswegs immer der wirklichen gleich ist. Dies ist nur dann der Fall, wenn die von dem Objekt ausgehenden Strahlenrichtungen bis zum Eintritt in das Objektiv keine Ablenkung erfahren.

Hat die zu messende Objektschicht den Brechungsexponenten n, so läßt sich bei Benutzung von Trockensystemen die wirkliche Dicke D aus der abgelesenen d in erster Annäherung durch die Gleichung $D = nd$ berechnen; bei Immersionssystemen wird, wenn n' der Brechungsexponent der Immersionsflüssigkeit ist, diese Gleichung in $D = nd/n'$ verändert. Würde man also z. B. die Deckglasdicke auf diese Weise bei homogenen Immersionen bestimmen, so wäre die abgelesene Dicke gleich der wirklichen, bei Wasserimmersionen wäre dagegen $D = 1{,}5\,d/1{,}3$ und bei Trockensystemen $D = 1{,}5\,d$, da der Brechungsexponent des Deckglases ungefähr 1,5 beträgt. Man sieht sofort, daß man auf diese Weise auch, wenn D und d bekannt sind, in erster Annäherung den Brechungsexponenten der untersuchten Schicht bestimmen kann. Vgl. Mineralog. Teil 1c.

β) Zählapparate. Soll die Zahl einzelner Körperchen in einem mikroskopischen Objekt festgestellt werden, so ist es vor allem nötig, das Volumen dieses Objekts selbst genau messen zu können. In den allermeisten Fällen handelt es sich um Flüssigkeiten, in denen die zu zählenden Elemente sich befinden, z. B. Blut, Hefe, Milch u. dgl. Um ein bestimmtes Volumen solcher Flüssigkeiten abmessen zu können, bedient man sich der sogenannten Zählkammern, die so eingerichtet sind, daß eine überall genau gleich dicke Schicht zwischen Deckglas und Grundfläche der Kammer hergestellt werden kann. Die beiden Flächen, zwischen denen sich die Schicht befindet, müssen genau plan geschliffen sein, ebenso die Fläche, auf die das Deckglas aufgelegt wird; alle drei Flächen müssen außerdem genau parallel liegen. Entspricht die Zählkammer diesen Bedingungen, so muß ferner darauf geachtet werden, daß die Unterseite des Deckglases der Auflagefläche ganz dicht anliegt.

Die Flächen müssen also auf das sorgfältigste gereinigt werden, zwischen Deckglas und Auflagefläche soll die Luftschicht so dünn sein, daß die Newtonschen Farben der ersten Ordnungen sichtbar werden. Das Auftreten dieser Farben ist das Kennzeichen dafür, daß der Niveaufehler 1 μ nicht übersteigt. Die Niveaudifferenz zwischen Unterfläche des Deckglases und der Grundfläche ist ebenfalls bis auf 1 μ genau abgestimmt, bei den meisten Kammern beträgt sie 0,100 mm. Auf der Grundfläche, die gewöhnlich als die Zählplatte bezeichnet wird, ist ein feines Netzmikrometer eingerissen. Die Seite der einzelnen Quadrate ist je nach dem Zwecke der Kammer verschieden groß, bei den meisten Blutkörperzählkammern (Hämozytometer) beträgt sie 0,05 mm, demnach ist bei einer Höhe von 0,100 mm das Volumen der über einem Quadrat stehenden Flüssigkeitssäule 0,00025 cmm.

Die meisten auszuzählenden Flüssigkeiten müssen erst verdünnt werden, um eine bequeme Zählung zu ermöglichen. Man benutzt dazu besonders gearbeitete Mischpipetten, an denen sich der Grad der Verdünnung ablesen läßt. Bei der Berechnung des Resultats ist die Verdünnung genau zu berücksichtigen.

Selbst bei sorgfältigster Ausführung der Zählung bleiben Beobachtungsfehler unvermeidlich. Eine genauere Diskussion der in Betracht kommenden Fehler läßt erkennen, daß man schon mehrere hundert Felder des Netzes durchzählen muß, wenn der wahrscheinliche Fehler des Gesamtresultats auf wenige Prozent herabgehen soll.

Handelt es sich nur darum, das Verhältnis der Anzahl zweier Körperchen verschiedener Art festzustellen, z. B. das Verhältnis zwischen roten und weißen Blutkörperchen, zwischen Hefezellen und Bakterien u. ähnl., so ist es natürlich nicht nötig, die absoluten Zahlen in einem Einheitsvolumen zu bestimmen, es genügt dann innerhalb eines gleichen Teiles des Sehfeldes die Auszählung vorzunehmen. Dies geschieht am einfachsten mittels der Okularnetzmikrometer oder auch durch Einlegung von Blenden in das Okular, deren Oeffnung einen ganz bestimmten Teil des Sehfeldes begrenzt. Es müssen dann ebenfalls eine größere Anzahl von Zählungen vorgenommen werden, wenn das Resultat mit einem geringen wahrscheinlichen Fehler behaftet sein soll.

4c) Einrichtungen für stereoskopische Beobachtungen. Bei schwachen Vergrößerungen ist eine beträchtliche Sehtiefe vorhanden, und es kann deshalb eine gute Stereoskopeinrichtung mit Vorteil angewandt werden, um körperliche Bilder zu erhalten. Mit wachsender Vergrößerung nimmt die Sehtiefe sehr rasch ab und wird bei starken Systemen fast gleich Null. Der Bereich der stereoskopischen Wahrnehmung wird dadurch so beengt, daß auch die besten Konstruktionen nutzlos bleiben, ja, bei unrichtiger Handhabung sogar zu bedenklichen Täuschungen Anlaß geben. Es ist deshalb ganz berechtigt, die binokulare mikroskopische Beobachtung auf die Fälle zu beschränken, wo sie wirklich von Vorteil ist, und bei allen stärkeren Vergrößerungen von etwa 200fach ab auf die Anwendung stereoskopischer Einrichtungen zu verzichten.

Für den geübten Mikroskopiker erwächst dadurch keineswegs ein Nachteil, denn er ist jederzeit in der Lage, die an sich flächenhaften Bilder körperlich zu kombinieren, da die Benutzung der Mikrometerschraube sofort Aufschluß über die höhere oder tiefere Lage der abgebildeten Schichten gibt. Allerdings muß er dabei stets wissen, in welchem Sinne die Vertikalverschiebung des Tubus erfolgt. Bei den meisten Mikroskopen verläuft diese Verschiebung immer eindeutig mit der Drehung des Kopfs der Mikrometerschraube. Einstellvorrichtungen, bei denen unter gleichsinniger Drehung der Schraube sowohl Heben als Senken des Tubus eintreten kann, sind deshalb, wenigstens für diesen Zweck, zu verwerfen.

Ein körperliches Bild kann stets nur dann wahrgenommen werden, wenn für beide Augen des Beobachters die Bilder hintereinander liegender Ebenen des Objekts parallaktisch gegeneinander verschoben werden, und wenn diese parallaktische Verschiebung für beide Augen entgegengesetzten Charakter hat. Dabei wird die sogenannte orthoskopische Wirkung, d. h. die wahre Aufeinanderfolge der Bildebenen stets dann eintreten, wenn das rechte Auge die näher gelegenen Ebenen nach links und die entfernteren nach rechts verschoben sieht und für das linke Auge das entgegengesetzte stattfindet. Im umgekehrten Falle tritt pseudoskopische Wirkung ein, d. h. die Aufeinanderfolge der Bildebenen scheint verkehrt zu sein.

Bei fast allen früheren Stereoskopeinrichtungen wurde nur ein Objektiv benutzt, und die abbildenden Büschel erfuhren durch verschieden

artige Prismenkombinationen eine Teilung in der Weise, daß für jedes Okular nur die Hälfte der Austrittspupille zur Wirkung kam. Unter diesen Umständen kommt orthoskopischer Eindruck nur dann zustande, wenn die Halbkreise der Austrittspupillen über den Okularen wie in

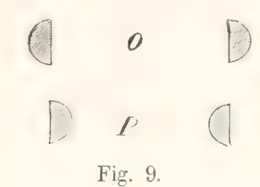


Fig. 9.

Figur 9 O gelagert sind, pseudoskopischer dagegen, wenn der in Figur 9P dargestellte Fall eintritt. Dabei ist es gänzlich gleichgültig, wie die innere Einrichtung der binokularen Tuben im übrigen beschaffen ist.

Bei dem Stereoskopokular nach Abbe findet die Teilung der Büschel in anderer Weise statt; hier haben die Austrittspupillen über beiden Okularen volle Kreisform und ohne geeignete Abblendung tritt überhaupt keine stereoskopische Wirkung ein. Erst durch Auflegen halbkreisförmiger Blenden auf die Okulare kann der Eindruck eines körperlichen Bildes hervorgerufen werden; und zwar hat man es ganz in der Hand, entweder orthoskopische oder pseudoskopische Wirkung zu erzielen. Liegen die Blenden so, daß die inneren Hälften der Pupillen verdeckt sind, so ist das Bild orthoskopisch, werden dagegen die äußeren Hälften abgeblendet, so ist pseudoskopische Wirkung vorhanden. Durch Verdrehen der Blenden kann man somit während der Beobachtung an demselben Objekt den Wechsel zwischen dem orthoskopischen und dem pseudoskopischen Eindruck sehr deutlich verfolgen.

In den letzten beiden Jahrzehnten hat eine andere Form der binokularen Mikroskope die früheren Konstruktionen fast vollständig verdrängt; sie ist durch die Vereinigung zweier vollständiger Mikroskope, deren Achsen unter einem Winkel von etwa 14° gegeneinander geneigt sind, charakterisiert. Beide Mikroskope sind durch Einfügung eines Porroschen Prismensatzes bildaufrichtend, und deshalb besonders gut für Präparieren und ähnliche Zwecke geeignet. Die Einfügung jener Prismen gestattet außerdem den Abstand der beiden Austrittspupillen dem Augenabstand des Beobachters innerhalb weiter Grenzen anzupassen. Auch etwaige Verschiedenheiten in der Sehweite der Augen können durch Verstellung des einen Objektivs ausgeglichen werden, so daß der stereoskopische Eindruck zur vollen Wirkung kommt. Zudem sind diese neueren binokularen Mikroskope auf den Vergrößerungsbereich beschränkt, der infolge größerer Sehtiefe auch wirklich die Erzeugung sehr plastischer körperlicher Bilder ermöglicht.

Der binokulare Tubus kann mit verschiedenen Stativformen verbunden werden. Für die Beobachtung kleinerer Objekte dient ein einfaches Mikroskopstativ; zur Untersuchung ausgedehnter Objekte läßt sich der Tubus mittels einer langen Zahn- und Triebbewegung über große Flächen hinwegführen. Der Tubus allein, mit einer Handhabe versehen, kann in jeder Lage als sogenanntes Dermatoskop benutzt werden, und für augenärztliche Zwecke wird der Tubus auf einem besonders hierzu gebauten Stativ als sogenanntes Kornealmikroskop verwendet. Auch eine photographische Kamera kann angebracht werden, um stereoskopische Aufnahmen zu erhalten; die Plattenebenen für die beiden Ebenen sind dann in entsprechender Weise gegeneinander geneigt.

4d) Spektralapparate. Für spektroskopische Untersuchungen im Mikroskop kommen hauptsächlich zwei Formen von Apparaten in Betracht. Bei der einen findet die prismatische Zerlegung im Okular statt, bei der anderen wird das Objekt bereits mit spektral zerlegtem Licht beleuchtet. Wird in der Ebene der Sehfeldblende des Okulars eine Spaltvorrichtung angebracht, so kann man die zu untersuchende Objektpartie so legen, daß ihr Bild den Spalt völlig bedeckt. Durch einen geeigneten Prismensatz läßt sich dann ein Spektrum des durchgehenden Lichtes erzeugen. Bei dem Spektralokular nach Abbe kann der Prismensatz über die Augenlinse des Okulars gebracht werden; durch ein seitlich angesetztes Rohr läßt sich mit dem Spektrum zugleich das Bild einer Wellenlängenskala entwerfen.

Außerdem kann über der einen Hälfte des Spaltes ein totalreflektierendes Prisma eingeschaltet werden, durch das das Licht von einem Vergleichsobjekt ebenfalls nach dem Prismensatz gelangt. Nach Einfügung dieses Reflexionsprismas sieht man die beiden Spektren nebeneinander liegen und zugleich mit ihnen erscheint das Bild der Wellenlängenskala. Bei einfacheren Formen der Spektralokulare fehlen Vergleichsprisma und Skala; im übrigen aber ist die Konstruktion im wesentlichen dieselbe.

Ebenfalls mit dem Okular verbunden wird ein anderer Spektralapparat, der photometrischen Zwecken dient, das Spektralphotometer nach Engelmann. Hier sind zwei voneinander unabhängige Spaltvorrichtungen vorhanden, und die Spaltbreiten können an geteilten Trommeln abgelesen werden. Durch Verstellen des einen Spaltes ändert man die Helligkeit eines Vergleichsspektrums solange, bis sie für bestimmte Spektralgebiete der Helligkeit der entsprechenden Stellen des Objektspektrums gleich wird.

Da die durchtretende Lichtmenge der Spaltöffnung proportional ist und das Verhältnis der beiden Spaltbreiten direkt abgelesen werden kann, so ergibt sich daraus auch das Verhältnis der Lichtstärken in den miteinander verglichenen Spektralgebieten. Mit den Spektren zugleich wird auch bei diesem Apparat wie beim Spektralokular eine Wellenlängenskala abgebildet.

Bei der anderen Gruppe von Spektralapparaten wird das Objekt entweder mit einzelnen Spektralfarben nacheinander beleuchtet oder es wird ein volles objektives Spektrum in der Objektebene entworfen. Der Hartnacksche Beleuchtungsapparat für monochromatisches Licht besteht aus einem stark dispergierenden Prismensatz und einem in seiner Ebene verschiebbaren Spalt. Er wird an Stelle des gewöhnlichen Beleuchtungsapparats unter dem Objekttisch angebracht. Durch allmähliche Verschiebung des Spaltes können kleine Objekte nacheinander mit fast monochromatischem Licht beleuchtet werden. Das Mikrospektralobjektiv nach Engelmann wird ebenfalls statt des Kondensors unter dem Objekttisch eingeschaltet. Mittels eines gewöhnlichen Mikroskopobjektivs, das dem oberen Ende des Apparats aufgeschraubt wird, läßt sich ein volles objektives Spektrum scharf in die Objektebene projizieren. Bringt man nun das zu untersuchende Objekt an die Stelle, wo das Spektrum liegt, so kann man die Einwirkung der verschiedenen Spektralgebiete direkt nebeneinander studieren. Eine geteilte Trommel dient auch hier zur Ablesung der wirksamen Spaltbreite. Zur Beleuchtung muß man bei diesen beiden Apparaten Gasglühlicht, Nernstlicht oder eine noch intensivere Lichtquelle wählen; denn der enge Spalt läßt nur wenig Licht hindurch, und deshalb ist eine höhere spezifische Intensität nötig, wenn man ein möglichst farbenreines Spektrum erhalten will.

4e) Polarisationseinrichtungen. Die meisten größeren Mikroskope können auch zur Untersuchung im polarisierten Lichte benutzt werden, wenn sie mit Polarisator und Analysator ausgerüstet werden, und wenn außerdem ein drehbarer Objekttisch vorhanden ist. Der Polarisator wird meist in den Diaphragmenträger des Abbeschen Beleuchtungsapparats eingehängt und der Analysator dem Okular aufgesetzt. Bei den besonders für Polarisationsuntersuchungen gebauten Stativen ist außerdem noch ein Analysator über dem Objektiv einzuschalten; auch ein Schieber zum Einlegen von Kristallplättchen ist zwischen diesem Analysator und dem Objektiv vorhanden.

Ferner kann bei solchen Instrumenten gewöhnlich noch ein schwaches Objektivsystem, die sogenannte Bertrandsche Linse durch eine Oeffnung des Tubus eingeführt werden. Da bei biologischen Untersuchungen die Beobachtung von Achsenbildern ziemlich selten vorkommt, so kann diese Einrichtung meist entbehrt werden, zumal man ganz dasselbe erreicht, wenn man an das untere Ende des Auszugtubus ein schwaches Objektiv anschraubt und auf diese Weise das Hilfsmikroskop zur Einstellung auf die Austrittspupille des Objektivs herstellt.

Das Einschalten eines Gips- oder Glimmerplättchens zwischen Okular und Objektiv ist zwar für viele Beobachtungen recht bequem, es wird aber durch diese Einschaltung die Güte der Bilder beeinträchtigt, und besonders bei stärkeren Vergrößerungen, wenn es sich um Beobachtung feinerer Strukturen handelt, kann dies sehr störend werden. Es ist deshalb besser, wenn nur der aufsetzbare Analysator benutzt wird, und das Kristallplättchen entweder direkt über dem Polarisator oder zwischen dem Okular und dem Analysator eingelegt wird.

Die Methoden der Bestimmung der Lage und des Verhältnisses der Elastizitätsachsen sind ganz dieselben wie in der Mineralogie. In der Regel genügt es, wenn bei den biologischen Untersuchungen ein Gipsplättchen Rot I. Ordnung angewandt wird, das auch zur Bestimmung des Charakters der Doppelbrechung bei Beobachtung der Achsenbilder völlig ausreicht. Vgl. Mineralog. Teil Id.

Für genauere Bestimmung der Stärke der Doppelbrechung dient am besten ein Kompensatorokular nach Siedentopf mit einschiebbaren Quarzkeilen; es ist dabei zu empfehlen, Beleuchtung im monochromatischen Licht zu benutzen, wie man sie durch eine Quecksilberbogenlampe mit vorgesetzten guten Farbenfiltern erhält. Auch die Anwendung eines Spektropolarisators ist in manchen Fällen erwünscht, zumal, wenn es sich dabei um die genaue Ermittelung der Absorptionsverhältnisse handelt. Die Einrichtung eines solchen Spektropolarisators ähnelt ganz der eines Engelmannschen Spektralobjektivs, nur ist noch ein Polarisator vorgeschaltet, so daß also die Projektion des objektiven Spektrums mittels polarisierten Lichtes erfolgt. Sowohl bei Verwendung des Kompensatorokulars wie auch des Spektropolarisators kann man die Verschiebungen der Interferenzstreifen genau messen.

Die Prüfung gefärbter Objekte auf Pleochroismus erfolgt ebenfalls in derselben Weise, wie in der Mineralogie, indem man nach Wegnahme des Analysators die Objekte über dem Polarisator dreht und dabei die Veränderungen in der Absorption beobachtet. Für genauere Messungen nach dieser Richtung ist am besten ein Spektropolarisator zu benutzen.

4f) Heizvorrichtungen. Es ist oft erwünscht, die mikroskopischen Objekte während der Beobachtung einer Temperaturänderung zu unterwerfen. Bei biologischen Untersuchungen spielen sich diese Aenderungen innerhalb verhältnismäßig enger Grenzen ab, und es genügen meist für diese Zwecke die heizbaren Objekttische, die in sehr verschiedenen Konstruktionsformen gebraucht werden. Die genaue Bestimmung der Temperatur am Orte des Objekts hat

allerdings beträchtliche Schwierigkeiten, denn die Thermometer an diesen Tischen geben jene Temperatur fast stets unrichtig an, weil aus sehr verschiedenen Gründen recht erhebliche Wärmeverluste eintreten können. Am besten bewähren sich nach dieser Richtung noch diejenigen Tische, die mit zirkulierendem Wasser von bestimmter Temperatur erwärmt werden.

Vorteilhafter ist die Einrichtung der Heizschränke für das ganze Mikroskop. Aus diesen Schränken ragt nur der Okulartubus und die Mikrometerschraube heraus. Der ganze Luftraum, der die übrigen Teile umgibt, ist von dem Schrank umschlossen; die Erwärmung erfolgt mittels einer durch Thermostaten zu regulierenden Heizvorrichtung. Wenn Mikroskop und Präparat einige Zeit in dem Schranke der gleichmäßigen Temperatur ausgesetzt werden, so wird auch das eingehängte Thermometer, dessen Skala von außen abzulesen ist, die Temperatur des Präparats ohne großen Fehler angeben. Erwärmungen bis zu 45° können ohne Nachteile für Stativ und Objektive längere Zeit hindurch vorgenommen werden, was für die meisten biologischen Untersuchungen ausreicht.

Mikroskope, die eine beträchtlich stärkere Erwärmung zulassen, wie sie z. B. für manche mineralogische und chemische Untersuchungen nötig wird, müssen mit Gasbrennern oder elektrischen Heizvorrichtungen und mit besonderen Schutzmitteln für die Linsensysteme ausgerüstet werden. Es sind in neuerer Zeit solche Instrumente konstruiert worden, die eine Erwärmung der Objekte auf mehrere hundert Grad ermöglichen. Auch genaue Ermittlung der am Orte des Objekts wirksamen Temperatur kann dabei durch thermoelektrische Messung erreicht werden. Auf Einzelheiten der Konstruktionen kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Vgl. auch Mineral. Teil 1h.

5. Mikrophotographie und Projektion. Bei der Photographie und Projektion mikroskopischer Präparate kommt es vor allem darauf an, daß die Leuchtkraft der vorhandenen Lichtquelle genügend ausgenutzt wird, um eine ganz gleichmäßige und möglichst große Helligkeit der Bilder zu erreichen. Die Bestrahlung der photographischen Platte oder des Projektionsschirms erfolgt durch eine Fläche, der als Zentralprojektion der Lichtquelle deren Leuchtkraft Punkt für Punkt zukommt, wenn man von den unvermeidlichen Verlusten durch Spiegelung, Brechung, Absorption absieht. Als solche äquivalente Leuchtfläche kommt in den allermeisten Fällen die Austrittspupille des gesamten optischen Apparates in Betracht, also entweder die Austrittspupille des Objektivs, wenn dieses allein benutzt wird, oder bei Projektion mit Okular die Austrittspupille des ganzen Mikroskops.

Die Zusammenstellung der Beleuchtungslinsen, die zwischen Lichtquelle und Objekt gebracht werden, muß deshalb stets von dem Gesichtspunkt aus geregelt werden, daß in der Austrittspupille wirklich eine der Lichtquelle äquivalente Leuchtfläche entsteht. Die Konstruktion und die Gruppierung der Beleuchtungslinsen muß somit je nach der gestellten Aufgabe recht verschieden sein, und es ist unmöglich, an dieser Stelle auf Einzelheiten der jeweiligen Anordnung einzugehen.

Die Beleuchtungsstärke in der Bildebene hängt nun nach einfachen photometrischen Gesetzen von der Größe der Austrittspupille, der Projektionsdistanz oder Bildweite und der Größe des Bildes ab. Je höher die numerische Apertur des Objektivs ist, desto größer wird unter sonst gleichen Umständen die Austrittspupille sein. Starke Vergrößerung und große Bildweite verringern natürlich die Helligkeit der Bilder. Bei der Mikrophotographie reicht je nach der Empfindlichkeit der Platte auch eine verhältnismäßig geringe Helligkeit noch aus, nur wird dadurch die Expositionszeit verlängert. Bei der Mikroprojektion sind in dieser Beziehung viel engere Grenzen gesteckt, da doch die Bilder meist von größerer Entfernung aus noch deutlich gesehen werden sollen.

Die für den Beschauer wirksame Helligkeit hängt außerdem noch von der Beschaffenheit des Schirmes ab. Bis vor kurzem gebrauchte man fast ausschließlich Gips- oder Papierschirme, die bei guter Beschaffenheit, d. h. bei guter diffuser Reflexion innerhalb eines größeren Winkelraumes einen annähernd gleichen Helligkeitseindruck hervorrufen. Neuerdings sind diffus reflektierende Metallschirme — meist aus Aluminium — eingeführt worden, bei denen jener Winkelraum, der sogenannte nutzbare Streuungswinkel, zwar kleiner ist, die aber innerhalb dieses Winkels eine bedeutend größere Reflexionskraft besitzen. Bei Verwendung solcher Metallschirme, die in verschiedener Ausführung hergestellt werden, sind deshalb die Zuschauerplätze nicht amphitheatralisch, sondern mehr in größerer Tiefe anzuordnen.

Für schwächere Vergrößerungen können Mikroskopobjektive von geringer numerischer Apertur allein benutzt werden, wenn auch die in der Brennweite entsprechenden und besonders für Projektion berechneten Systeme wie Mikroplanare u. dgl. aus verschiedenen Gründen meist vorzuziehen sind. Mittlere achromatische Objektive, deren Apertur 0,4 und mehr beträgt, geben allein, wenigstens bei großer Bildweite, mangelhafte Bilder; sie müssen deshalb entweder mit einer Korrektionslinse oder mit Okularen benutzt werden. Als Okulare kommen wie bei der subjektiven Beobachtung für die achromatischen Objektive die gewöhnlichen Huygensschen Okulare in Betracht. Bei den Apochromaten müssen stets die Kompensationsokulare oder noch besser die

sogenannten Projektionsokulare verwendet werden. Diese Okulare haben anstatt der Augenlinse ein sorgfältig für Projektion korrigiertes Linsensystem, das auf sehr verschiedene Bildweiten eingestellt werden kann. Der Korrektionszustand dieser Okulare ist im übrigen derselbe wie der der Kompensationsokulare, sie sind deshalb auch vorteilhaft mit den starken Achromaten zu verwenden.

Während bei der Projektion von Objekten, die mit durchfallendem Licht beleuchtet werden, selbst bei starken Vergrößerungen immerhin noch genügende Helligkeit der Bilder zu erreichen ist, sind der Projektion von Bildern undurchsichtiger Objekte viel engere Grenzen gezogen. Schon auf dem komplizierteren Wege über den Vertikalilluminator erleiden die beleuchtenden Büschel Verluste an Intensität, die sich je nach der Oberflächenbeschaffenheit der Objekte noch sehr beträchtlich steigern können, so daß eine wirksame Projektion nur unter ganz günstigen Umständen möglich wird. Bei der Mikrophotographie dagegen lassen sich auch bei starken Lichtverlusten immer noch gute Erfolge erzielen, besonders bei solchen Objekten, die eine gut reflektierende Oberfläche haben. Die Metallographie macht deshalb von mikrophotographischen Aufnahmen selbst mittels stärkster Systeme ausgiebigen Gebrauch, und bei richtiger Handhabung der Beleuchtungseinrichtungen werden überraschend scharfe und kontrastreiche Photogramme erhalten.

Für Mikrophotographie reicht in vielen Fällen Gasglühlicht, Nernstlicht, Acetylenlicht oder Kalklicht als Lichtquelle aus; selbst eine gute Petroleumlampe kann hierfür verwendet werden. Nur in wenigen Fällen ist elektrisches Bogenlicht unbedingt nötig, so z. B. bei Aufnahmen für kinematographische Zwecke oder wenn aus anderen Gründen die Expositionszeit stark herabgesetzt werden muß, ferner bei sehr starken Vergrößerungen und Anwendung stark absorbierender Farbfilter; auch die Aufnahmen bei Beleuchtung mit auffallendem Licht sowie bei Dunkelfeldbeleuchtung erfordern meist sehr intensive Lichtquellen. Bei der Mikroprojektion ist es dagegen fast immer notwendig, elektrisches Bogenlicht zu verwenden. Ist die abzubildende Objektpartie nur klein, also bei Anwendung starker Objektive, so können auch kleine Bogenlampen, die nur wenige Ampère brauchen, verwendet werden, denn es handelt sich darum, nur die kleinen Flächen zu beleuchten, von der Bilder entworfen werden sollen. Es ist dabei von Wichtigkeit, die Größe des erleuchteten Feldes immer so zu wählen, daß nur das abzubildende objektive Sehfeld Licht empfängt, was durch richtige Handhabung einer Kollektorlinse mit Irisblende vor dem Beleuchtungsapparat leicht erreicht werden kann. Diese Regel ist bei der Mikrophotographie stets einzuhalten, es wird dadurch schädliches Nebenlicht und außerdem zu hohe Erwärmung der Präparate vermieden, denn je größer die durchleuchtete Fläche wird, desto größer wird auch die Erwärmung der Präparate trotz den gewöhnlich eingeschalteten Wasserkammern.

Durch mikrophotographische Aufnahmen kann das Auflösungsvermögen des Mikroskops gesteigert werden. Da um so feinere Strukturen sichtbar werden, je kleiner die Wellenlänge der beleuchtenden Strahlung ist, so wird schon im äußersten Violett, für das die photographische Platte noch sehr empfindlich ist, eine Erweiterung der Auflösungsgrenze möglich. Noch mehr in dieser Richtung wirkt natürlich die Verwendung ultravioletten Lichtes. Durch die Bemühungen A. Köhlers ist es gelungen, noch ultraviolette Strahlen von der Wellenlänge 275 $\mu\mu$ für die Mikrophotographie nutzbar zu machen. Allerdings muß dann statt des Glases, das für diese Strahlen schon undurchlässig wird, zur Herstellung sämtlicher Linsen, Objektträger und Deckgläschen Quarz verwendet werden. Die genaue Einstellung auf das Objekt kann durch einige Probeaufnahmen bewirkt werden, nachdem die vorläufige Einstellung mittels einer eingeschalteten fluoreszierenden Platte aus Uranglas erfolgt ist. Die Objektive, die zu diesen Aufnahmen benutzt werden müssen, sind sogenannte Monochromate; sie sind sphärisch für die in Betracht kommende Wellenlänge gut korrigiert, was sich leicht ermöglichen ließ, da ja die chromatische Aberration hier ganz außer Betracht bleiben kann.

6. Dunkelfeldbeleuchtung und Ultramikroskopie. Bei den gewöhnlichen Beobachtungsmethoden wird die Beleuchtung so geregelt, daß die Bilder der Objekte im Sehfeld dunkel auf hellem Grunde erscheinen; es treten also die beleuchtenden Strahlen direkt in das Objektiv ein und werden, wenn keine Abblendung erfolgt, nach dem mikroskopischen Bilde weiter geleitet. Man bezeichnet ein so entstandenes Bild auch als Hellfeldbild oder negatives Bild. Wird nun aber in irgendeiner Weise verhindert, daß die direkt durch das Sehfeld gehenden beleuchtenden Strahlen nach dem mikroskopischen Bilde gelangen, so müssen alle Teile des Bildes dunkel bleiben, nach denen diese direkten Strahlen verlaufen würden. Objekte, die im Sehfeld liegen, können aber auch unter diesen Umständen noch abgebildet werden, wenn ihre Struktur so beschaffen ist, daß sie die beleuchtenden Büschel ablenken. Verlaufen aber die abgelenkten Büschel innerhalb des ausnutzbaren Oeffnungswinkels des Objektivs, so gelangen sie auch zur Bildebene und erzeugen dort helle Bilder der Objekte auf dunklem Grunde. Auf diese Weise entsteht das Dunkelfeld- oder positive Bild. In den positiven Bildern lassen sich zwischen den hellen

Konturen und dem dunklen Untergrund viel stärkere Kontraste erzielen und infolge dessen können selbst sehr kleine Objekte, die weit unterhalb der Größenordnung der Lichtwellenlängen liegen, noch deutlich sichtbar werden, während sie im Hellfeld der Beobachtung überhaupt nicht mehr zugänglich sind. Es läßt sich also durch die Dunkelfeldbeleuchtung zwar nicht die Grenze des Auflösungsvermögens, wohl aber die Grenze der Sichtbarkeit erweitern, und es ist dabei stets zu beachten, daß auch bei der Ultramikroskopie, wie man diese Untersuchungsmethode genannt hat, die Bilder von Strukturen, deren Dimensionen in der Größenordnung der Wellenlängen oder darunter liegen, nicht mehr objektähnlich sein können.

Der Kontrast zwischen Dunkel und Hell im positiven Bild wird nun um so stärker, je größer die Intensität der Lichtquelle ist und je vollständiger die Abblendung der direkten Büschel gelingt. Intensive Lichtquellen zu benutzen bietet keine Schwierigkeiten, dagegen bedarf es sehr sorgfältig konstruierter Beleuchtungseinrichtungen, um die direkten Büschel gänzlich auszuschließen und die Intensität der abgelenkten Büschel auf das höchste zu steigern. Es kann hier nicht auf Einzelheiten der Konstruktionen eingegangen werden, es sollen nur die wesentlichsten Bedingungen hervorgehoben werden, die zur Erzielung möglichst kontrastreicher Dunkelfeldbeleuchtung erfüllt sein müssen.

Um den Eintritt der direkten Beleuchtungsbüschel in das Mikroskop zu vermeiden, sind mehrere Wege eingeschlagen worden. Der nächstliegende ist, die Achsen dieser Büschel so schief zur Achse des Mikroskops einfallen zu lassen, daß die Büschel in ihrem ganzen Umfang außerhalb des nutzbaren Oeffnungswinkels des Objektivs verlaufen. Die äußerste Grenze, die man auf diese Weise erreichen kann, ist durch die sogenannte orthogonale Dunkelfeldbeleuchtung (Fig. 10) gegeben, bei der die Achsen der

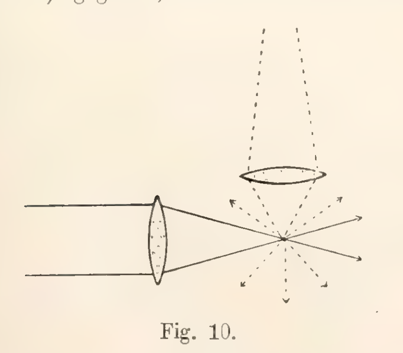


Fig. 10.

Beleuchtungsbüschel senkrecht zur Mikroskopachse verlaufen. Diese Methode ist in dem ersten von Siedentopf und Zsigmondy konstruierten Ultramikroskop angewandt worden; sie ist zwar durch die neueren und erfolgreichen Konstruktionen von Dunkelfeldkondensoren etwas verdrängt worden, sie bleibt aber die am besten geeignete für die Untersuchung fester Kolloide. Man kann durch scharfe Abbildung eines Spaltes gewissermaßen einen dünnen Schnitt durch das Objekt legen, der sehr intensiv beleuchtet wird, während die darüber und darunter liegenden Schichten ganz dunkel bleiben.

Der orthogonalen steht die koaxiale Dunkelfeldbeleuchtung gegenüber, bei der die Achse des Beleuchtungssystems mit der des Mikroskops zusammenfällt. In diesem Falle handelt es sich darum, alle Strahlenrichtungen, die direkt in das Mikroskop eintreten würden, aus dem Oeffnungswinkel des Beleuchtungssystems zu entfernen. Dies kann in verschiedener Weise geschehen, z. B. durch Anbringen einer Zentralblende im Beleuchtungsapparat oder auch im Objektiv. Ferner können jene Strahlenrichtungen, die noch außerhalb der Zentralblende im Kondensor verlaufen, durch Totalreflexion an der Oberfläche des Deckglases entfernt werden. Auf diese Weise erhält man den dunkelsten Hintergrund im positiven Bild, da keinerlei Störungen durch katadioptrische Bilder an den Linsenflächen des Objektivs eintreten. Werden außerdem auch im Beleuchtungssystem alle derartigen Nebenbilder unmöglich gemacht, so ist die hauptsächlichste Forderung für gute Dunkelfeldbeleuchtung erfüllt. Es wird dies erreicht durch die in neuerer Zeit sehr vervollkommneten Spiegelkondensoren, in denen die Hinleitung der beleuchtenden Strahlen nach dem Objekt nur durch Spiegelungen stattfindet. In den Figuren 11a bis c sind drei Formen solcher Kondensoren schematisch dargestellt. Bei dem Paraboloidkondensor nach Siedentopf (Fig. 11a) ist nur eine spiegelnde parabolische Fläche wirksam, hier ist zwar die Strahlenvereinigung in der Objektebene gut, aber die Sinusbedingung ist nicht erfüllt, d. h. die Brennweite für die verschiedenen Zonen ist nicht gleich und deshalb kann das Maximum der erreichbaren Beleuchtungsstärke nicht eintreten. Die beiden anderen Kondensoren, der Kardioidkondensor nach Siedentopf (Fig. 11b) und der Spiegelkondensor nach v. Ignatowsky (Fig. 11c) wirken durch Reflexion an zwei Flächen. Bei dem Kardioidkondensor ist auf Grund einer besonderen Brennpunkteigenschaft der Kardioide die Sinusbedingung erfüllt und es kann auch in der praktischen Ausführung durch eine dem Kardioid sehr angenäherte Kugelfläche das Maximum der Helligkeit erzielt werden. Ganz ähnlich liegen die Verhältnisse bei dem in Figur 11c dargestellten

Kondensor, auch hier ist auf die Erfüllung der Sinusbedingung möglichst Bedacht genommen worden. Uebrigens wird man in den meisten Fällen, wo es sich nicht um die äußerste erreichbare Lichtstärke handelt, mit den Paraboloidkondensoren auskommen, die bequemer zu handhaben sind, da sie nicht so empfindlich gegen kleine Mängel der Zentrierung sind und auch in der Dicke der zu benutzenden Objektträger einen etwas größeren Spielraum lassen.

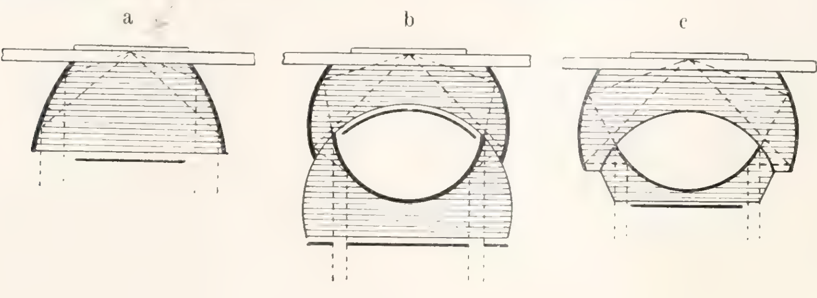


Fig. 11.

Bei allen ultramikroskopischen Untersuchungen ist stets auf möglichste Sauberkeit der Glasflächen und auf Vermeidung von Luftblasen in der Immersionsflüssigkeit zwischen Kondensor und Objektträger zu achten. Ferner darf die Schicht, wenigstens bei der koaxialen Dunkelfeldbeleuchtung, nur eine geringe Dicke haben. Bei feineren Untersuchungen unter Anwendung starker Vergrößerung und Bogen- oder Sonnenlichts als Lichtquelle soll die Dicke der Objektschicht nur 1 bis 2 μ betragen. Dies wird durch Benutzung einer besonderen Beobachtungskammer erreicht, die ähnlich wie die Zählkammern gebaut ist und in der außerdem Objektträger und Deckglas aus Quarz statt aus Glas bestehen, weil sich die Quarzflächen besser reinigen lassen und auch weniger empfindlich gegen äußere Verletzungen sind.

Literatur. **E. Abbe**, *Gesammelte Abhandlungen I. Jena 1904.* — **C. Naegeli und S. Schwendener**, *Das Mikroskop. II. Aufl. Leipzig 1877.* — **L. Dippel**, *Handbuch der allgemeinen Mikroskopie. II. Aufl. Braunschweig 1882.* — **A. Zimmermann**, *Das Mikroskop. Leipzig und Wien 1895.* — **N. R. Neuhauss**, *Lehrbuch der Mikrophotographie. III. Aufl. Leipzig 1907.* — **A. Köhler**, *Beleuchtungsapparat für gleichmäßige Beleuchtung mikroskopischer Objekte mit beliebigem einfarbigem Licht. Zeitschr. f. wiss. Mikrosk., XVI, 1899.* — **Derselbe**, *Ein lichtstarkes Sammellinsensystem für Mikroprojektion. Ebenda, XIX, 1902.* — **Derselbe**, *Mikrophotographische Untersuchungen mit ultraviolettem Licht. Ebenda, XXI, 1904.* — **H. Siedentopf und R. Zsigmondy**, *Ueber Sichtbarmachung und Größenbestimmung ultramikroskopischer Teilchen. Drudes Ann. d. Phys., X, 1903.* — **H. Siedentopf**, *Paraboloidkondensor. Zeitschr. f. wiss. Mikrosk., XXIV, 1907.* — **Derselbe**, *Ueber ultramikroskopische Abbildung. Ebenda, XXVI, 1909.* — **Derselbe**, *Ueber einen neuen Fortschritt in der Ultramikroskopie. Verh. d. deutschen phys. Ges. XII, 1910.* — **E. A. Wülfing**, *Ueber Projektion mikroskopischer Objekte. Sitzb. d. Heidelberger Akademie 1911.* — *Außerdem ist auf die zahlreichen Prospekte und Gebrauchsanweisungen hinzuweisen, die von den größeren optischen Werkstätten, besonders von der Firma C. Zeiß in Jena in mustergültiger Weise, herausgegeben werden.*

H. Ambronn.

I. B. Mikrotome.

Bei der Untersuchung von Tieren und Pflanzen kommt man nur in den allerseltensten Fällen mit dem Studium des ganzen, unversehrten Organismus aus; fast immer ist er zu groß oder nicht durchsichtig genug, um ohne weiteres den Einblick in seine Struktur zu gewähren. Man muß ihn also öffnen, seine Organe herausnehmen und meist auch diese noch weiter verarbeiten, um von ihnen brauchbare Präparate zu erhalten [vgl. hierzu unter IIA) dieses Artikels], die der mikroskopischen Analyse zugänglich werden. In der Regel bedarf man hierbei feiner Schnitte entweder durch den ganzen Organismus oder den näher zu erforschenden Teil. Bei ihrer Herstellung darf man aber ja nicht, wie etwa beim Brotschneiden, das Messer hin und her ziehen oder mehrere Male neu ansetzen, sondern muß es glatt hindurchführen, weil ja sonst der Schnitt eine unebene Oberfläche erhalten würde.

Mitunter, namentlich zur vorläufigen Orientierung, kann man die Schnitte mit einem sehr scharfen Rasiermesser machen; man hält dabei das Objekt, z. B. ein Stück Leber, Niere usw., in der linken Hand, klemmt es auch wohl, wenn es gar zart ist, zwischen Streifen von Holundermark, Kork oder dergleichen ein, die mit

geschnitten werden. Früher wurde ausschließlich so verfahren, und da hing es ganz von der Geschicklichkeit des Forschers ab, wie dünn und gleichmäßig die Schnitte ausfielen. Daher finden wir bereits 1770 den Ansatz zu maschineller Erleichterung des Schneidens: das Objekt — in diesem Falle Holz — steckt in einem senkrechten Zylinder, der oben offen ist und sich hier zu einer horizontalen Platte verbreitert; über diese läßt man das Messer frei gleiten, und nach jedem Schnitte wird das Objekt von unten her um eine bestimmte Größe gehoben (Fig. 1). Solche einfachen Mikrotome werden zwar immer noch von neuem erfunden und angepriesen, sind aber schon längst von besseren Instrumenten weit überholt.

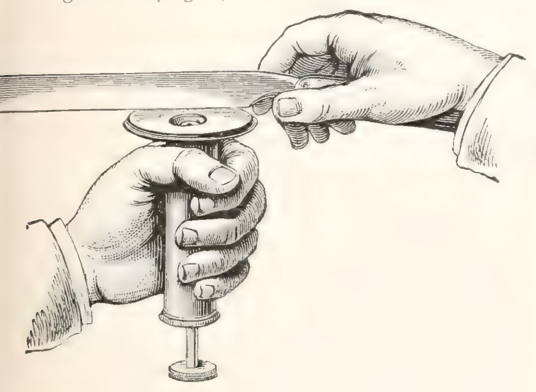


Fig. 1.

Das Ziel, rein maschinell, d. h. fast ganz unter Ausschaltung der technischen Fähigkeiten des Mikroskopikers, ein Objekt in eine lückenlose Serie von dünnen Schnitten zu zerlegen, läßt sich auf sehr verschiedene Weise erreichen. Wie es scheint, sind alle nur möglichen Konstruktionen eines derartigen Instrumentes bereits praktisch durchgeführt worden, und so können wohl nur noch in Einzelheiten Verbesserungen auftreten. Natürlich muß der Typus eines Mikrotoms anders sein, wenn umfangreiche Schnitte durch harte Gewebe, z. B. Holz, verlangt werden, als wenn es sich um ganz dünne Schnitte durch einen zarten Embryo handelt; ferner sind da so disparate Forderungen zu erfüllen, wie z. B. ein ganzes menschliches Hirn in Schnitte von 30, 20, ja noch weniger μ Dicke zu zerlegen, oder das Messer durch frisches Gewebe zu führen, das die richtige Härte erst durch Gefrieren auf dem Mikrotome selbst erhält, usw. Mikrotome, von denen relativ Geringes verlangt wird, die sogenannten Studentenmikrotome, sind recht einfach gebaut und billig; sie kosten etwa 30 M.; dagegen stellen sich die umfangreichen, schweren Maschinen, die äußerst solide und stabil sein müssen, bis auf weit über 1000 M.

Ganz allgemein muß von einem guten Mikrotome verlangt werden, daß die Schnitte damit alle gleichmäßig dünn geraten. Hat also das Messer vom Objekte eine Scheibe von der gewünschten Dicke abgetrennt, so muß es vor dem nächsten Schnitte so weit gesenkt, oder das Objekt so weit gehoben werden, daß die folgende Scheibe genau so ausfällt; nach keiner Richtung hin darf das Messer seitlich ausweichen. Diese Stabilität bildet die wichtigste Voraussetzung, gilt aber ebensowohl vom Instrumente wie vom Messer selbst; dieses darf nicht federn, und seine Schneide muß resistent genug sein, um auch harte Gegenstände zu bewältigen, ohne sich umzubiegen oder zu zersplittern. Natürlich dringt es durch Einlagerungen von Kalk, Kieselsäure usw. nicht — sind sie minimal, so kann die Schneide sie vor sich herschieben — und so sind den Leistungen der Mikrotome nach dieser Richtung hin starke Schranken gesetzt. Leider auch nach einer anderen: zwar könnte man nach jedem Schnitte das Objekt leicht nur um den Bruchteil eines μ heben, aber auch die beste Schneide würde sich auf solche Feinheiten nicht einlassen. Daher zählen Schnitte von 1 bis 2 μ. Dicke zu den Ausnahmen. In der Regel begnügt man sich mit solchen von 15 bis 5 μ.

Die wesentlichen **Typen** der Mikrotome sind kurz folgende.

A. Messer horizontal, Schnittfläche des Objektes ebenfalls, nach oben gerichtet.

a) Das Messer gleitet lose oder in einen Metallrahmen eingespannt, der auf Spitzen läuft, über eine Glas- oder Metallplatte hin und schneidet dabei das Objekt, das aus einer Oeffnung in der Mitte der Platte etwas hervorragt; nach jedem Schnitte wird durch eine Schraube entweder das Objekt gehoben oder die Platte gesenkt: Zylinder-Mikrotom (Fig. 1), wesentlich nur noch für große Schnitte durch Hirn usw. in Gebrauch (Mikrotom nach Gudden u. a.).

b) Das Messer ist fest (am Griffe; in der Mitte; an beiden Enden) auf der oberen Fläche eines Schlittens eingespannt, der in einer horizontalen Bahn aus Metall oder Glas mit möglich kleinster Reibung (meist auf Spitzen von Elfenbein) gleitet: Schlittenmikrotome.

1. Das Objekt wird nach jedem Schnitte in senkrechter Führung durch eine Schraube direkt gehoben: Mikrotome von Jung, Schanze, Strasser u. a.

2. Das Objekt ruht auf einem Schlitten mit Elfenbeinspitzen, der nach jedem Schnitte durch eine Schraube auf einer schrägen (Steigung meist 1: 20) Bahn aufwärts geschoben wird: Mikrotome von Thoma und Jung (Fig. 2), Reichert u. a.

c) Das Messer ist an einem horizontalen Arme befestigt, der um eine senkrechte Achse rotiert; nach jedem Schnitte wird das Objekt durch

eine Schraube gehoben, seltener das Messer gesenkt: Mikrotome von Jung, Fromme, Reichert (Fig. 3), Roy, Thate u. a.

d) Aehnlich dem vorigen, nur ist das Messer als die 4. Seite eines Parallelogrammes an 2 senkrechten Achsen in der Weise gelenkig befestigt, daß es in einer flachen Kurve schwingt und zugleich längs verschoben wird: Mikrotom von Beck und Becker.

e) Messer unbeweglich; das Objekt ruht auf einem Schlitten, der auf horizontaler Bahn gleitet, und wird nach jedem Schnitte gehoben: Mikrotome von De Groot, Minot (précision microtome), Leitz, Jung (Tetrander), Cambridge Scientific Company u. a.

f) Messer unbeweglich; das Objekt ruht auf der oberen Fläche eines Zylinders, der um eine senkrechte Achse gedreht und nach jedem Schnitte gehoben wird: Mikrotom von Triepel.

B. Messer senkrecht, mit der Schneide nach oben (nur selten nach unten), Schnittfläche des Objektes ebenfalls senkrecht.

a) Messer unbeweglich; Objekt auf einem

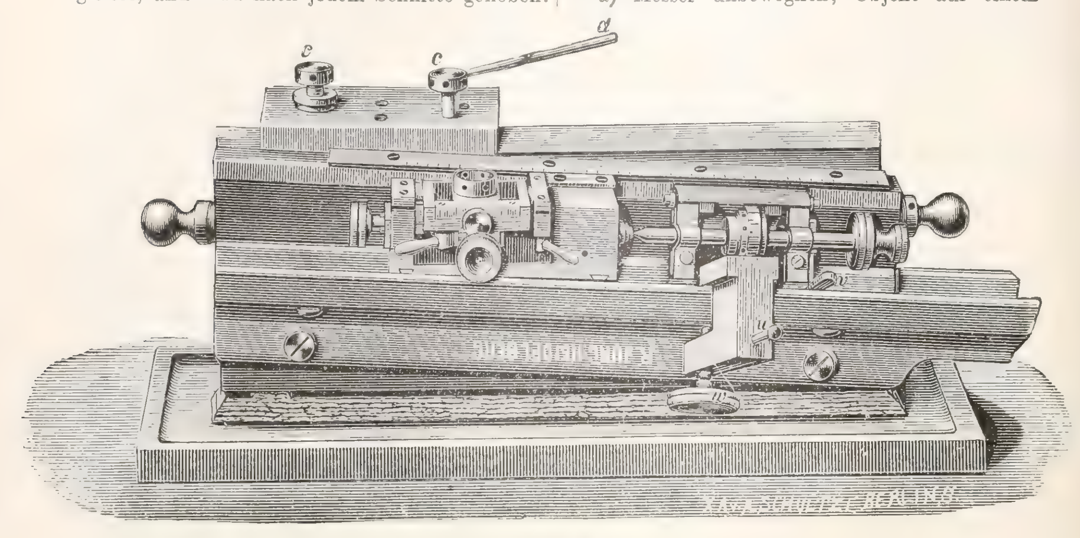


Fig. 2.

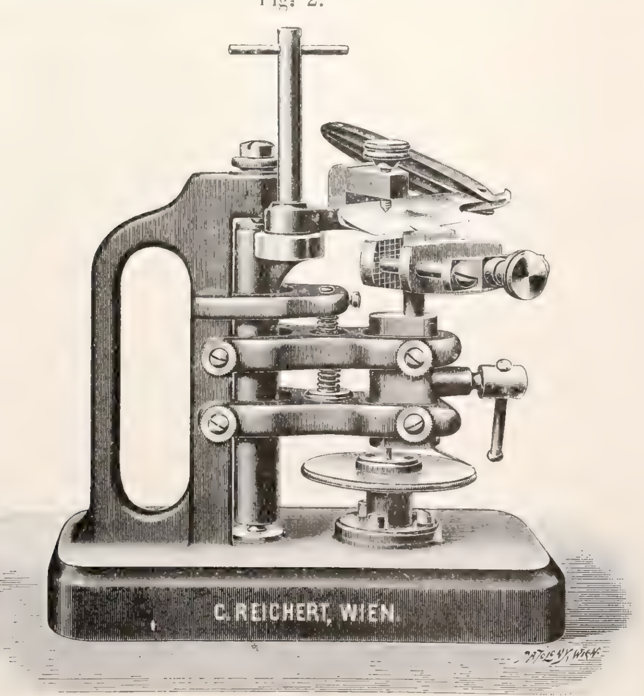


Fig. 3.

Schlitten, der in senkrechter Bahn läuft und sich nach jedem Schnitte dem Messer in horizontaler Führung nähert: Mikrotome von Ryder, Minot (Fig. 4), Radais, Spencer.

b) Messer unbeweglich; Objekt am Ende eines Armes, der um eine horizontale Achse schwingt; diese dreht sich nach jedem Schnitte um eine andere horizontale Achse und nähert so das Objekt dem Messer: Schaukelmikrotome von Caldwell, Jung (Fig. 5), van der Stad.

c) Das Messer rückt in horizontaler Führung nach jedem Schnitte dem Objekte näher, dieses geht in senkrechter Bahn auf und ab: Mikrotome von Reichert, Reinhold und Giltay u. a.

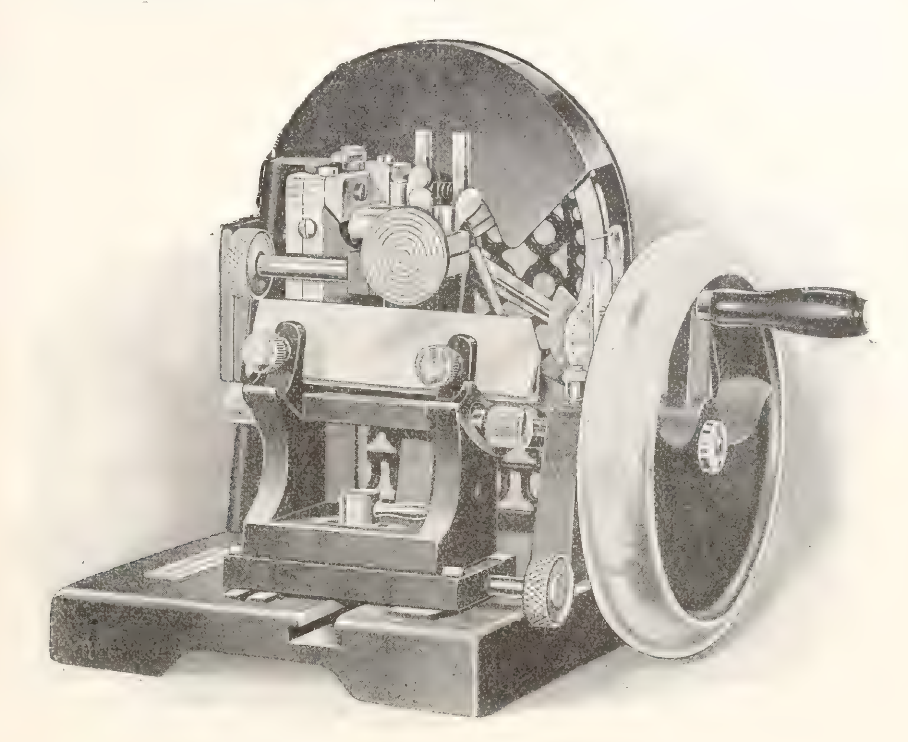


Fig. 4.

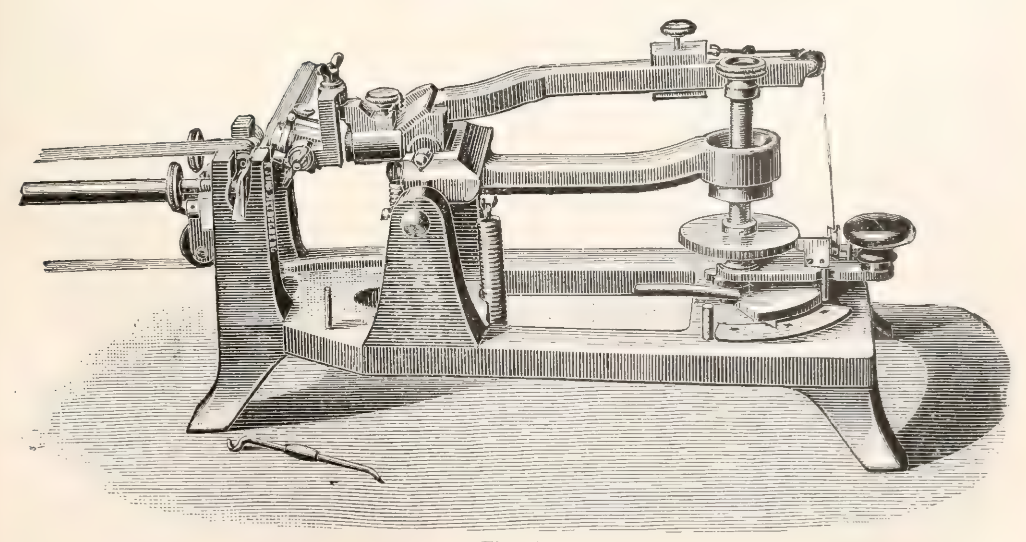


Fig. 5.

d) Messer wie bei c); Objekt auf der Peripherie eines Rades: Mikrotom von Pfeifer.

Bei a) und b) sind die Schnittflächen eben, bei c) und d) Stücke eines Zylindermantels.

Typen für spezielle Zwecke sind natürlich auch vorhanden: Tauchmikrotome zum Schneiden unter Flüssigkeit; besonders starke Instrumente zum Schneiden von Hölzern; Vorrichtungen zur Gewinnung von Keilschnitten; Gefriermikrotome (Fig. 6) zum Schneiden

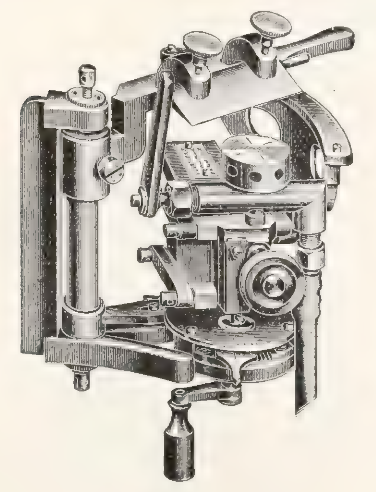


Fig. 6.

gefrorener Gewebe (als Kältequelle dient Schnee mit Salz, Aether, Aethylchlorid, flüssige oder feste Kohlensäure usw.) u. a. m.

Bei den neueren Mikrotomen ist zwar dafür gesorgt, daß die Lage des Objektes zum Messer in ziemlich weiten Grenzen geändert werden kann, so daß die Schnittrichtung dem Wunsche des Forschers entspricht; jedoch sind die Vorkehrungen dazu meist lange nicht so perfekt wie die anderen Teile des Instrumentes. Von gefrorenen oder in Celloidin eingebetteten Objekten können die Schnitte nur einzeln gemacht und weiter behandelt werden; von den in Paraffin eingebetteten hingegen lassen sich auch Schnittbänder gewinnen: man orientiert die Schneide genau quer zur Zugrichtung des Messers oder Objektes, stutzt den Paraffinmantel um das Objekt vorher so zu, daß die Schnittfläche rechtwinklig ausfällt, und stellt eine Seite davon parallel zur Schneide. Auch führt man wohl diese Schnittbänder, besonders wenn sie lang sind, über ein Band ohne Ende und schneidet sie dann je nach den Dimensionen der Objektträger in Stücke. Ein eigenes Mikrotom zur Herstellung solcher Bänder in Spiralform nebst Mikroskop zur Betrachtung dieser Spiralen auf kreisrunden Objektträgern hat Lebrun konstruiert.

Als Messer können in manchen Fällen Rasiermesser dienen, doch federn oft die Klingen zu stark oder sind nicht lang genug, so daß eigene Mikrotommesser in allerlei Formen existieren, darunter solche mit bogiger oder gar halbkreisförmiger Klinge, die sich aber schlecht schleifen lassen. Beim Schneiden wird das Messer entweder mit der Hand bewegt oder, wenn es auf einem Schlitten befestigt ist, so wird dieser bei manchen Typen durch eine Schraube ohne Ende, eine Kette (oder Saite) mit Zahnrad und Kurbel gezogen. Der Objekthalter wird nach jedem Schnitte entweder von Hand oder automatisch gehoben. Bei zwei Typen von Mikrotomen (Erdös, Bruce) ist der Antrieb des Messerschlittens durch den Fuß vorgesehen. Nur äußerst selten dient Wasserkraft. Ist das Objekt leicht schneidbar, so daß sich Schnittbänder machen lassen, so sind 100—150 Schnitte in der Minute keine außergewöhnliche Leistung.

II. Spezielle mikroskopische Technik.

A. Zoologie und Anatomie.

Um ein tierisches Objekt mit dem Mikroskope untersuchen zu können, bringt man es auf eine Glasplatte, den Objektträger, und mit diesem auf den Mikroskoptisch. Will man nur die Oberfläche und ihr Relief kennen lernen, so genügt in der Regel solch einfache Vorrichtung; nur ist das gewöhnliche Tageslicht, das zur Beobachtung mit dem unbewaffneten Auge oder der Lupe ausreicht, für eine stärkere Linse oft zu schwach und muß durch Beleuchtungslinsen u. dgl. konzentriert werden. Will man jedoch weiter in den Bau des Objektes eindringen, so ist man auf das durchfallende Licht angewiesen, das man durch einen Plan- oder Hohlspiegel von unten her in das Objekt gelangen läßt, eventuell auch durch Kondensoren (vgl. oben I A) verstärkt. Alsdann würde aber das Relief die Lichtstrahlen zum Teil ablenken, also legt man auf das Objekt ein Deckglas, d. h. eine (meist nur 150 μ dicke) Glasplatte, und füllt aus demselben Grunde den Raum zwischen beiden Platten mit Wasser oder einer stärker brechenden Flüssigkeit (Glyzerin, Benzol, Harzlösung) an. Reicht selbst das nicht aus, so durchtränkt man das Objekt mit einem solchen Medium und macht es so durchsichtiger; ferner zerlegt man es, falls es nicht dünn genug ist, in so feine Scheiben, daß man diese einzeln kräftig durchleuchten kann. Um aber durch solche Prozeduren das Objekt so wenig wie möglich zu ver-

ändern, muß man es in der geeigneten Weise dazu vorbereiten.

Am lebenden Objekte — falls es zu groß ist, an seinen lebensfrischen Teilen — lassen sich oft, besonders an durchsichtigen Wassertieren, die man in ihrem Elemente untersucht, die Bewegungen und das Spiel der Muskeln dabei, der Transport der Nahrung durch den Darmkanal, der Blut- oder Lymphkreislauf usw. beobachten. In der Regel hat man aber dabei für die kontinuierliche Erneuerung des Wassers zu sorgen, damit das Tier nicht erstickt; auch darf das Deckglas, das ja das Tier als Ganzes festhalten soll, nicht allzu stark drücken; man stützt es daher an den Rändern auf Glaskapillaren, Papierstreifen usw. Mitunter ist dagegen ein etwas stärkerer Druck nötig, um das Tier abzuplatten und so auch die inneren Schichten den starken Linsen zugänglich zu machen; hierzu dienen eigene kleine „Kompressorien". Um die Bewegungen des Tieres zu verlangsamen, wendet man Mittel zur Betäubung (Cocain, Chloroform usw.) an, benutzt auch wohl als mechanisches Hemmnis ein dichteres Medium, z. B. Gummischleim. Alle diese Mittel müssen aber von Fall zu Fall ausprobiert werden.

Beim Studium der lebenden Objekte darf man zwar mit einiger Sicherheit darauf rechnen, normale Vorgänge und Strukturen zu beobachten; indessen kommt man damit allermeist nicht weit genug, sondern ist beim Eingehen in die Feinheiten fast immer auf die eigens zu diesem Zwecke getöteten und sorgfältig präparierten Tiere oder Teile von ihnen angewiesen. Nur darf man dabei nicht vergessen, daß selbst der rascheste Tod Veränderungen im tierischen Gewebe herbeiführt, die infolge der späteren Manipulationen nur noch zunehmen und nicht selten recht bedenklich werden können. Was man also an toten Objekten beobachtet, ist höchstens dann als normal anzusehen, wenn so resistente Gebilde, wie Haare, Nägel, Knochen usw. in Frage kommen. Sonst jedoch muß man alles, was man an jenen sieht, stets mit den entsprechenden Gebilden des lebenden Objektes vergleichen; sonst bleiben Fehlschlüsse nicht aus.

Wie gelangt man nun zu brauchbaren Präparaten toter Tiere oder von Teilen von ihnen, die mehr oder Feineres zu sehen gestatten als der lebende Organismus? Der Tötung hat manchmal die Betäubung voranzugehen, damit sich das Tier in dem tötenden Mittel nicht noch so stark zusammenziehe, daß es unbrauchbare Präparate liefert. Dies gilt namentlich von vielen Seetieren. Zum Töten dient teils Hitze — man wirft das Tier in heißes Wasser, heißen Alkohol usw. — teils bei gewöhnlicher Temperatur ein starkes Gift, wie Quecksilberchlorid, Formalin, Ueberosmiumsäure usw., oder Alkohol, der durch Wasserentziehung wirkt. Nach oder zugleich mit dem Töten spielt sich das Fixieren der Gewebe ab; es soll diese in den Stand setzen, mit möglich geringster Schädigung alle weiteren Prozeduren bis zum fertigen mikroskopischen Präparate zu ertragen. Handelt es sich dabei 1. um so kleine und dünne Tiere, daß man sie unzerlegt untersuchen kann, so braucht man allermeist nur den Ueberschuß des Tötungs- und Fixiermittels durch Auswaschen mit Wasser oder Alkohol zu entfernen und kann nun das Präparat entweder in Glyzerin oder in ein Harz (Kanadabalsam, Dammar usw.) überführen: in beiden Fällen, um Schrumpfungen zu vermeiden, recht behutsam und allmählich, und beim Harze, das sich mit Wasser nicht verträgt, unter Entfernung des Wassers durch Alkohol und dieses wieder durch Benzol oder eine andere Flüssigkeit, die ein Solvens für das Harz bildet und zugleich mit Alkohol klar mischbar ist. War dagegen 2. das Tier zu umfangreich, so zerlegt man es — oder nur die zur Untersuchung gewünschten Organe — zuvor in Schnitte. Zu diesem Behufe wird es wie in Fall 1 erst sorgfältig ausgewaschen, dann in Alkohol gebracht und hierin wasserfrei gemacht; beide Prozeduren können mehrere Tage dauern. Im Alkohol wird es meist hart genug, um sich mit einem scharfen Messer in feine Scheiben zerlegen zu lassen; jedoch werden diese nur von sehr geübter Hand wirklich dünn und gleichmäßig genug, und so benutzt man zum Schneiden fast immer ein Mikrotom (vgl. diesen Artikel oben S. 897). Indessen auch eine solche Maschine gestattet nur sehr selten das Schneiden des Objektes direkt in Alkohol, meist hingegen bettet man dieses vorher ein, d. h. man durchtränkt es mit einem Stoffe, der alle Teile des Objektes durchdringt und, wenn er erstarrt ist, miteinander derart verklebt, daß sie dem Messer nicht ausweichen können, sondern in ihrer richtigen Lage durchschnitten werden. Als solche Stoffe dienen fast nur Paraffin oder Celloidin. Soll in Paraffin geschnitten werden, so wandert das Objekt, das in Alkohol ganz wasserfrei geworden sein muß, in eine Flüssigkeit, die sich einerseits mit jenem, andererseits mit Paraffin verträgt, also Benzol, Chloroform und ähnliche Medien; hat es hierin seinen Alkohol abgegeben, so wird es in eine Lösung von Paraffin in demselben Mittel gebracht und darin auf einem Wasserbade (Thermostaten) so lange erwärmt, bis das Medium verdunstet ist. Nach dem Erkalten wird dann das Paraffin

nebst dem Objekte darin eine einzige Masse bilden, die ohne weiteres mit dem Mikrotome geschnitten werden kann. Freilich ist bei allen diesen Vorgängen eine Schrumpfung des Objektes nicht zu vermeiden, aber bei genügender Aufmerksamkeit relativ unschädlich zu gestalten. Weniger gebräuchlich ist die Einbettung in C e l l o i d i n. Dieses, eine besonders reine Art der Schießbaumwolle, wird in Alkohol plus Aether oder ähnlichen Flüssigkeiten gelöst und durchdringt dann, freilich oft erst in Monaten, das ganz entwässerte Objekt, das man aus Alkohol hineingebracht hat, schon bei gewöhnlicher Temperatur und meist ohne es zu deformieren. Man braucht dann nur das Lösungsmittel unter gewissen Kautelen verdunsten zu lassen und erhält eine fast durchsichtige Masse in und um das Objekt, die vorzüglich schneidbar ist, aber nur selten ebenso dünne Schnitte liefert wie das Paraffin. Auch die doppelte Einbettung, erst in Celloidin, dann mit diesem in Paraffin, ist bei zarten Objekten im Gebrauch und gibt oft sehr gute Resultate.

Um die Schnitte, namentlich eine ganze Reihe von ihnen, in der keiner fehlen darf, in mikroskopische Präparate umzuwandeln, klebt man sie auf den sorgfältig gereinigten Objektträger fest: entweder mit einem K l e b m i t t e l (Eiweiß, das man hinterher zum Gerinnen bringt, usw.) oder einfach mit Wasser durch Kapillarattraktion. Dabei beläßt man in der Regel das Celloidin, weil es im Harze fast so durchsichtig wird wie Glas, muß dagegen das Paraffin, dessen kristallinisches Gefüge der Beobachtung hinderlich sein würde, durch Eintauchen des Objektträgers im Xylol oder dergleichen auflösen und kann dann erst die Harzlösung darauf bringen.

Durchtränkt man tierisches Gewebe mit Glyzerin oder Harzen, um es durchsichtig zu machen, so werden zwar viele Einzelheiten sichtbar, die sonst dem Auge entgingen, andere hingegen verschwinden, sobald ihre Lichtbrechung die gleiche ist wie die des Glyzerins oder Harzes. Ein derartiges Präparat zeigt daher oft recht wenig, weil es allzu durchsichtig ist. Man hilft diesem Uebelstande durch künstliche Färbung ab, und so spielt diese in der Mikrotechnik schon seit 1851 eine bedeutende Rolle. Es handelt sich aber nur ganz selten um eine T i n k t i o n nach Art der technischen Färberei von Wolle, Seide usw.: diese Garne sollen ja allermeist ganz gleichmäßig gefärbt werden. Mit solch diffuser Färbung ist eben dem Mikrotechniker kaum je gedient, vielmehr möchte er in seinem Objekte entweder alle Zellkerne oder diesen und jenen Einschluß im Zellplasma oder die Nervenbahnen, Muskelfasern, das Knochen- und Knorpelgewebe, die Blutkörperchen usw. so gefärbt haben, daß sie besonders hervortreten. Der Farbstoffe und Methoden hierzu sind außerordentlich viele und es werden immer neue benutzt und ausgedacht. Außer der Karminsäure und dem Hämatoxylin nebst ihren Verbindungen mit Tonerde, Kupfer usw. sind eine Unmenge von Teerfarbstoffen im Gebrauch. Kleine Tiere kann man in toto färben, von größeren die zu untersuchenden Organe; häufig aber und zur Erzielung mancher speziellen Effekte werden die Schnitte gefärbt, wenn sie bereits auf dem Objektträger festgeklebt sind. Die Lösungen hierzu werden meist in Wasser gemacht, jedoch auch oft in Alkohol oder anderen Flüssigkeiten; hat die Färbung die gewünschte Intensität erreicht, was unter Umständen einen vollen Tag dauert, so wird der Ueberschuß der Färblösung ausgewaschen, und nun das Objekt entweder direkt in Glyzerin oder Harz überführt, oder je nach dem beabsichtigten Effekte mit einem anderen Farbstoffe, einer Säure, einem Alkali u. a. m. behandelt. Auch kombiniert man nicht selten die Lösungen mehrerer Farbstoffe zu einem Färbgemische derart, daß beim Hineinbringen des Objektes die Zellkerne sich den einen Farbstoff aussuchen, das Zellplasma einen anderen, oder daß hinterher die Muskeln in einer Farbe, das Blut in einer anderen, das Bindegewebe in der dritten erscheint usw. Ferner benutzt man oft die Eigenschaft bestimmter organischer Stoffe, mit Metallen (Silber; Gold; Quecksilber; Osmium usw.) gefärbte Verbindungen einzugehen, zum Nachweise von Nervenbahnen und ähnlichen Feinheiten. Endlich stellt man auch wohl zum Studium des Vorkommens von Eisen, Zink, Kalium und anderen Elementen oder von Harnsäure, Zucker, Glykogen usw. in den Geweben m i k r o c h e m i s c h e R e a k t i o n e n an, hat aber leider auf diesem Gebiete mit großen Schwierigkeiten zu kämpfen.

Eine besondere Art der Untersuchung tierischer Gewebe bildet die M a z e r a t i o n. Bei ihr handelt es sich im Gegensatze zu den oben geschilderten Methoden, bei denen die Teile des Objektes in ihrem natürlichen Zusammenhange bleiben sollen, um die künstliche Isolierung der Zellen und anderen Elementargebilde: man bringt also die Teile des Tieres in Gemische — fast immer wässerige, oft schwach alkalische, aber auch saure — zur Auflösung des Kittes, der zwischen den Zellen liegt und sie zusammenhält, muß aber dafür sorgen, daß hierbei die Zellen selber so wenig wie möglich geschädigt werden. So erhält man sie isoliert und kann sie nun von allen Seiten

betrachten, ihre Fortsätze verfolgen usw., kurz manches ermitteln, was sich auf Schnitten oder durch die anderen Methoden nur unvollkommen eruieren läßt.

Die Lebensdauer der mikroskopischen Präparate ist sehr verschieden: ungefärbte oder in Karmingemischen tingierte scheinen, wenn sie in Harz eingeschlossen sind, unbegrenzt lange haltbar zu sein, dagegen verblassen zarte Färbungen oft schon in einigen Tagen und können nur selten wiederhergestellt werden.

Literatur. ***Lee und Mayer,*** *Grundzüge der mikr. Technik für Zoologen und Anatomen 4. Aufl., Berlin 1910. — Encyclopädie der mikr. Technik 2. Aufl., Berlin und Wien 1910.* — ***Apáthy,*** *Mikrotechnik der tierischen Morphologie, Braunschweig 1896 bis 1901 (unvollendet).*

P. Mayer.

B. Botanik.

Will man pflanzliche Objekte mit dem Mikroskop untersuchen, so bringt man sie, geradeso wie es für tierische angegeben wurde, auf die als Objektträger bezeichneten Glasplatten und mit diesen derart auf den Tisch des Mikroskops, daß sie über dessen kreisrunde Durchbrechung zu liegen kommen. Handelt es sich nur um das Studium der Oberflächenverhältnisse des Objekts, so genügt auch hierbei meist diese einfache Vorrichtung. Auch reichen die einfachen Präparier- oder Lupenmikroskope, die entweder monokular oder binokular, ferner mit bildumkehrendem Prisma oder Okular oder ohne solche zur Anwendung kommen können, zur Untersuchung in vielen Fällen vollkommen aus. Diese sind namentlich dann von Vorteil, wenn das zu untersuchende Gebilde bei mehr oder minder starker Vergrößerung erst aus einem Pflanzenteil herauspräpariert werden muß, was mit Hilfe von Präpariernadeln, bei frischem Material frei oder in Wasser, bei Spiritusmaterial in Glycerin, auf dem Objektträger, und zwar entweder auf dunklem oder hellem Grunde, bei abgeblendetem oder nicht abgeblendetem, durchfallendem Licht geschieht. In letzterem Falle wird es dann meist von Vorteil sein, die durch den Mikroskopspiegel bewirkte Belichtung des Gegenstandes noch durch Kondensoren zu verstärken. Optische Gründe (vgl. bei II A) lassen es dann ratsam erscheinen, das Objekt in Wasser, Glycerin oder anderen brechbaren Medien mit aufgelegtem Deckglas zu untersuchen. Vielfach ist ein Durchsichtigmachen mit aufhellenden Mitteln, wie Chloralhydrat, Eau de Javelle, Karbol u. a. geboten. Besonders dicke Objekte müssen zum Studium in zarte Schnitte zerlegt werden.

Lebenserscheinungen an pflanzlichen Organismen, bezw. Pflanzenteilen beobachten wir, namentlich wenn es sich um besonders zarte ein- oder wenigzellige Gebilde handelt, am besten an Objekten, die wir, um den Druck durch das Deckglas, ferner ein Verdunsten des Untersuchungsmediums auszuschalten, in den hängenden Tropfen einer feuchten Kammer überführt haben. Man benutzt dazu Objektträger, in deren Oberflächenmitte eine kreisrunde Höhlung eingeschliffen ist, die mit dem den Hängetropfen auf seiner Unterseite tragenden Deckglas bedeckt und verschlossen wird. Auch Objektträger mit aufgekittetem Glasring, dem das Deckglas mit dem Hängetropfen aufzulegen ist, leisten als feuchte Kammern gute Dienste, namentlich dann, wenn man z. B. mit Vaseline einen besseren Abschluß bewirkt hat. Derartige feuchte Kammern lassen sich auch für Durchleitung von Gasen, Elektrizität etc. einrichten. Handelt es sich um die Beobachtung besonders kleiner, auch schnell beweglicher Objekte, wie Schwärmsporen, Spermatozoiden, so wenden wir zweckmäßig Dunkelfeld-Beleuchtung an, indem wir in den Diaphragmenträger des Abbeschen Beleuchtungsapparates, der heutzutage an allen größeren Mikroskopen angebracht ist, eine Zentralblendung einschieben, oder die neuerdings zur Erzielung derartiger Beleuchtung konstruierten Kondensoren in Anwendung bringen. (vgl. I A 6). Es erscheinen dann die Objekte hell leuchtend auf dunklem Grunde. Um die Bewegung zu verlangsamen setzt man Gelatine oder Gummilösungen der Beobachtungsflüssigkeit zu. Soll die Bewegung jedoch voll erhalten, dabei aber der bewegliche Organismus innerhalb eines übersehbaren Raums im Gesichtsfelde festgehalten werden, so legt man ein Stück feinen Musselin auf den die Objekte enthaltenden Wassertropfen. Die betreffenden Organismen führen dann in den engen Maschen des Musselins ihre Bewegungen aus. Lebenserscheinungen an derberen Objekten, wie z. B. die Plasmaströmung in dünnen Blättern, lassen sich in gewöhnlicher Weise unter Deckglas studieren; eventuell kann man, um den Druck des Deckglases zu mindern bezw. aufzuheben, Glasfadenstückchen oder Aehnliches zugleich mit dem Objekt in die Beobachtungsflüssigkeit bringen, auch an vier den Ecken des aufzulegenden Deckgläschens entsprechenden Stellen Wachs- oder Paraffintröpfchen anbringen. So hergestellte Präparate haben den Vorteil, daß man leicht durch Anlegen eines Fließpapierstreifens an eine Seite des Deckglasrandes und Ansetzen eines Flüssigkeitstropfens an die entgegengesetzte das Medium unter dem Deckglas wechseln kann, was namentlich bei Ausführung von Versuchen, die das Verhalten des Zellinhaltes

gegen verschiedene Agentien betreffen, z. B. bei Plasmolyse, ferner bei mikrochemischen Reaktionen notwendig ist. Mikroskopische Wachstums- und Größenmessungen nimmt man mittels Mikrometer vor (bei höheren Pflanzen unter Anwendung eines Horizontalmikroskops). Untersuchungen bei farbigem Licht werden in Dunkelkammern angestellt, in welchen das zum Mikroskopspiegel oder dem Präparat gelangende Licht entsprechend gefärbte Medien passiert hat. Ueber die Untersuchung der Präparate im spektral zerlegten Lichte vgl. I A 4d. Will man pflanzliche Objekte bei erhöhter Temperatur unter dem Mikroskop untersuchen, so benutzt man einen heizbaren Objekttisch. Zu Beobachtungen in der Kälte verwendet man Kälteobjekttische oder versenkt das Mikroskop samt Präparat in einen Gefrierkasten, der die Beobachtung und die Ausführung der beim Mikroskopieren notwendigen Handgriffe gestattet. — Umfangreichere pflanzliche Organismen oder Pflanzenteile müssen zwecks mikroskopischen Studiums in feine Schnitte zerlegt werden. Soll die Untersuchung an lebensfrischem Material vorgenommen werden, so spannt man entsprechend zugestutzte und orientierte Teile davon je nach deren Konsistenz zwischen die Längshälften eines Holundermark-, Kork- oder Holzstückchens ein, und führt aus freier Hand mit einem möglichst scharfen, hohlgeschliffenen Rasiermesser zarte Querschnitte aus. Dabei benutzt man zum Fernhalten der die mikroskopische Untersuchung erschwerenden Luft die Vorsicht, die Schneide des Messers mit Wasser zu befeuchten, das zugleich mit dem Messer in das Objekt eindringt. Die Schnitte bringt man dann in den Tropfen der Untersuchungsflüssigkeit (meist Wasser, wässerige Lösungen von Zucker oder Farbstoffen oder anderer Stoffe, wie Jod), der man dann eventuell noch Aufhellungsmittel (Eau de Javelle, Chloralhydrat, Kalilauge usw.) zufügen kann, auf den Objektträger und bedeckt mit dem Deckglas. Kommt es darauf an, möglichst gleichmäßig dünne, lückenlos aufeinanderfolgende Schnitte aus einem Objekt herzustellen, so benutzt man ein Handmikrotom, oder die einfachen Schul- oder Studentenmikrotome, deren Gefriervorrichtung außerdem hier und da gute Dienste leisten kann. Härtere Gegenstände, wie Hölzer, schneidet man am besten an Mikrotomen mit hobeleisenähnlichen Messern. Gute Schnitte kann man gefärbt und ungefärbt in Glycerin-Gelatine als Dauerpräparate aufbewahren.

Auch Herbarmaterial kann für die mikroskopische Untersuchung verwendet werden. Man weicht dann vor Herstellung der Schnitte die Objekte in Wasser, hier und da mit einem Zusatz von Kalilauge oder Ammoniak, auch in konzentrierter Milchsäure u. ä. auf.

In Spiritus oder Formol konserviertes oder aufbewahrtes Material läßt sich auf gleiche Weise wie das frische in Schnitte zerlegen, die am besten in Glycerin zu untersuchen sind. Harte Gegenstände, wie Hölzer, sind leichter zu schneiden, wenn sie eine Zeit lang in einem Gemisch von Alkohol und Glycerin gelegen haben.

Will man feinere Details, so die Bestandteile des Zellinhalts, studieren, so genügen die bisher angeführten Methoden nicht. Die pflanzlichen Objekte müssen vielmehr auf ähnlich komplizierte Weise, wie sie für die tierischen angegeben wurde (s. IIA), fixiert, geschnitten, gefärbt und zwecks Aufbewahrung zum weiteren Studium in stark lichtbrechende Medien eingeschlossen werden. Als Fixierungsmittel für pflanzliche Objekte haben sich hauptsächlich Sublimatlösungen, Alkohol-Eisessig und Chrom-Osmium-Essigsäure in verschiedenen Konzentrationen, kalt oder heiß angewandt, bewährt. Zur oberflächlichen Orientierung über die in dem zu fixierenden Material vorliegenden Entwicklungszustände dient Methylgrün-Essigsäure, die so zur Anwendung kommt, daß man eine kleine Partie des Objekts in einem Tropfen davon durch leichten Druck auf das Deckglas zerquetscht oder zarte Rasiermesserschnitte in einen solchen überträgt. Es treten dann die Zellkerne mit grüner Färbung deutlich hervor. Nach gründlichem Auswaschen der Fixierungsflüssigkeiten, ferner Entwässern in Alkohol von steigender Konzentration, das namentlich bei kleinen Objekten, um Schrumpfungen zu vermeiden, äußerst vorsichtig geschehen muß, werden die fixierten Objekte mittels Chloroform, oder Cedernöl unter der Wirkung der höheren Temperatur eines Wärmeschranks in Paraffin (Celloidin kommt bei pflanzlichen Objekten nur äußerst selten zur Verwendung) eingebettet und nach dem Erkalten mit dem Mikrotom geschnitten. Mittels Eiweiß-Glycerin und Wasser erfolgt dann bei mäßiger Wärme das Aufkleben der Serienschnitte auf den Objektträger, dann ein Entfernen des Paraffins mit Xylol oder besser noch Terpentin, da dies zugleich die Schwärzung des mit osmiumhaltigen Gemischen fixierten Materials beseitigt, was sonst mittels einer alkoholischen Wasserstoffsuperoxydlösung geschehen müßte, dann Beseitigung des Paraffinlösungsmittels durch absoluten Alkohol und Uebertragen in eine oder mehrere Farblösungen oder Farbstoffgemische. Schnitte aus Material, das in nicht chromsäurehaltigen Gemischen fixiert wurde, beizt man vor dem Uebertragen in die Farblösung zweckmäßig

mit 1% Chromsäure, die dann in Wasser auszuwaschen ist. Als Färbungsmittel haben sich für pflanzliche Objekte besonders Safranin oder Safranin-Gentianaviolett-Orange, schließlich Eisenhämatoxylin bewährt. Die Anwendung der Farbgemische hat den Vorteil, daß sich die Bestandteile des Schnittes, die den einzelnen in den Gemischen enthaltenen Farbstoffen gegenüber sich different verhalten, deutlicher voneinander abheben. Die gefärbten Präparate entwässert man mit Alkohol und schließt sie nach Behandlung mit Nelkenöl in Xylol-Canadabalsam ein. Sie sind unbegrenzt haltbar.

Wie bei tierischen, ist auch bei pflanzlichen Objekten zur Kenntnis der Elemente ihres Aufbaus die Isolierungsmethode durch Mazeration oft mit großem Vorteile zu verwenden. Bei härterem Material, wie Holz, leistet besonders chlorsaures Kali mit Salpetersäure, heiß angewandt, gute Dienste, bei zarterem, wie solchem von krautartigen Gewächsen, Salzsäure-Alkohol und Ammoniak, bezw. heiße, konzentrierte Ammoniaklösung allein.

Literatur. *E. Strasburger, Das botanische Praktikum. 5. Aufl. Bearbeitet von* ***E. Strasburger und M. Koernicke.*** *Jena 1912. — Encyclopaedie der mikroskopischen Technik. 2. Aufl. Berlin und Wien 1910. —* ***A. Meyer,*** *Erstes mikroskopisches Praktikum. 2. Aufl. Jena 1907. —* ***Ch. J. Chamberlain,*** *Methods in Plant Histology. Chicago. Neuer Abdruck der 2. Aufl. 1910.*

M. Koernicke.

C. Bakteriologie.

1. Mikroskop und Zubehör. Das Stativ muß einen möglichst großen Objekttisch haben, und mit einer feinarbeitenden Mikrometerschraube, daneben auch mit Zahn und Trieb zu grober Einstellung, versehen sein. Von Objektiven genügen für die meisten bakteriologischen Zwecke zwei: ein schwächeres von etwa 16 mm Brennweite für die Betrachtung von Bakterienkolonieen, und eine Oelimmersion von möglichst kurzer Brennweite (1,4 bis 2 mm). Erwünscht, aber nicht unbedingt nötig, ist ein starkes, mit Korrektionsfassung versehenes Trockensystem von etwa 3 mm Brennweite zur raschen Durchmusterung von Präparaten, die man nicht erst mit Cedernöl in Berührung bringen will.

Unbedingt nötig ist bei der Benutzung der Immersion der Abbesche Beleuchtungsapparat (über Einrichtung und Handhabung dieses Apparats vgl. S. 880 und 881). Die Irisblende erlaubt den Oeffnungswinkel des Beleuchtungskegels dem jeweiligen Bedürfnisse anzupassen. Für gefärbte Präparate wird der Winkel möglichst groß genommen d. h. die Irisblende ganz geöffnet; es verschwindet hierdurch das durch Differenzen im Brechungsvermögen hervorgerufene Bild der ungefärbten Teile des Präparats, und es treten die gefärbten Bakterien scharf und deutlich hervor. Bei ungefärbten Präparaten muß die Blende verengert werden, und zwar am zweckmäßigsten soweit, daß die Apertur des Beleuchtungskegels etwa ein Drittel der Apertur des Objektivs beträgt, was man durch Hineinsehen in den Tubus, nach Herausnahme des Okulars, prüfen kann.

2. Beleuchtung. Helles Tageslicht, womöglich helle Wolken, gibt die beste Beleuchtung. Ist aber das Tageslicht nur schwach oder in seiner Intensität rasch wechselnd, so ist, besonders für ungefärbte Präparate, künstliche Beleuchtung vorzuziehen. Die beste Lichtquelle ist hängendes Gasglühlicht und zwar ein kleiner Brenner mit einer Milchglaskugel von etwa 8 cm Durchmesser. Die Lampe wird ziemlich tief, etwa 15 cm über der Tischfläche und etwa 20 cm vom Spiegel des Mikroskops entfernt aufgestellt. Durch einen in geeigneter Lage angebrachten Schirm, muß das Auge des Beobachters vor direktem Lichteinfall geschützt werden.

3. Anfertigung der Präparate. 3a) Ungefärbte Präparate. Hängender Tropfen. Tuschenmethode. Für orientierende Betrachtung genügt es, das zu untersuchende Material in einem Tropfen Flüssigkeit auf dem Objektträger zu verteilen, und mit einem Deckgläschen zu bedecken. Der Rand des Deckgläschens wird zweckmäßig mit Vaselin umzogen. Die zwischen Deckglas und Objektträger befindliche Flüssigkeitsschicht muß so dünn sein, daß das Deckglas fest adhäriert — sonst macht es bei Einstellungsveränderungen die Bewegungen des Objektives mit, wodurch sehr lästige Bewegungen der Flüssigkeit und der suspendierten Elemente hervorgerufen werden.

Längere und störungsfreie Beobachtung ermöglicht die Anwendung des „hängenden Tropfens". Auf ein Deckgläschen wird mit Hilfe der Platinöse ein nicht zu großer Flüssigkeitstropfen gebracht, und in diesem das zu untersuchende Material mit dem Platindraht verteilt. Von flüssigen Materialien wird ohne weitere Verdünnung ein Tropfen aufs Deckglas gebracht. Wichtig ist die richtige Menge der Einsaat: für den Anfänger kann als Maßstab gelten, daß der Tropfen schwach, aber deutlich getrübt sein muß. Als Beobachtungsflüssigkeit eignet sich am besten die gewöhnliche Nährbouillon, die besonders dann nötig ist, wenn es sich um die Konstatierung der Beweglichkeit

der Bakterien handelt. Wasser und auch physiologische Kochsalzlösung wirken häufig schädlich auf die Bewegungsorgane ein. Das so präparierte Deckgläschen wird dann auf einen hohlgeschliffenen Objektträger so aufgelegt, daß der Tropfen frei in die Höhlung hineinhängt; die Höhlung des Objektträgers wird vorher mit gelbem amerikanischem Vaselin umzogen. Das Deckglas muß so fest angedrückt werden, daß das Vaselin ringsum die Höhlung dicht abschließt. Bei der Einstellung des Präparates tut der Anfänger gut, zunächst mit dem schwachen Objektiv den Tropfen, womöglich ein größeres Materialbröckelchen, genau in die Mitte des Gesichtsfeldes einzustellen; dann wird das schwache Objektiv gegen die Immersion ausgewechselt und der Mikroskoptubus soweit heruntergedrückt, daß die Frontlinse das Deckglas berührt. Die Einstellung ist jetzt zu tief; man hebt also während man in das Mikroskop hineinsieht, durch Linksdrehen der Mikrometerschraube den Tubus, bis das Bild erscheint. Bei diesem Verfahren läßt sich die oft sehr unangenehme Zertrümmerung des Deckglases mit Sicherheit vermeiden. Hat man die richtige Einstellung erreicht, so verschiebt man das Präparat, bis man an den Rand des Tropfens gelangt. Der Rand eignet sich am besten zur Beobachtung, weil die Flüssigkeitsschicht hier am dünnsten ist; auch pflegen sich hier sauerstoffbedürftige Bakterien in reichlicher Zahl zusammen zu drängen und besonders lebhafte Bewegungen auszuführen. Umgekehrt sind meistens in der alleräußersten Randzone schon einige Exemplare zur Ruhe gekommen, so daß ihre Form hier bequem studiert werden kann.

Die Bedeutung der Untersuchung im hängenden Tropfen liegt vor allem darin, daß sie über die Eigenbewegung der Bakterien Aufschluß gibt. Zu Irrtümern kann hier die sogenannte Molekularbewegung Anlaß geben, welcher, wie alle kleinsten suspendierten Körperchen, auch die Bakterien unterliegen. Es ist zwar meistens nicht schwer, diese passive, tanzende, regellose Bewegung von der aktiven, scheinbar zielbewußten, Eigenbewegung zu unterscheiden; doch können, wenn die Molekularbewegung sehr lebhaft, oder die Eigenbewegung schwach ist, auch für den Geübteren wohl Zweifel entstehen.

Auch für die Untersuchung auf Sporen, die sich durch ihre starke Lichtbrechung kennzeichnen, ist die Untersuchung im hängenden Tropfen geeignet.

Ausgezeichnete Dienste leistet auch die in neuester Zeit von Burri angegebene Tuschenmethode, besonders dann, wenn es sich um die Auffindung sehr zarter Bakterien handelt, die bei der Suspension in gewöhnlicher Flüssigkeit leicht der Beobachtung entgehen. Das zu untersuchende Material wird mit verdünnter flüssiger Tusche (1:10) vermischt, und von der Mischung mit Hilfe einer spitzen Zeichenfeder oder einer feinen Glaskapillare eine Anzahl kleinster Tröpfchen auf eine erstarrte Gelatinefläche gebracht. Die Tusche breitet sich dort zu ganz dünnen Scheibchen aus, in denen sich bei der mikroskopischen Betrachtung die Bakterien als farblose helle Lücken markieren. Bedeckt man die Gelatine mit einem Deckglas, so kleben die Scheibchen beim Abheben des Deckglases an ihm fest und lassen sich auf diese Weise bequem untersuchen. Noch einfacher, aber weniger gut, ist es, die Tusche in dünner Schicht auf einen gut gereinigten Objektträger auszustreichen. Auch hier lassen sich nach dem Trocknen die Bakterien hell auf grauschwarzem Grunde erkennen. Es gelingt durch das Tuscheverfahren mit Leichtigkeit, die Spirochäte pallida nachzuweisen, ja sogar die Bakteriengeißeln lassen sich, wenigstens bei großen Spirillen, sichtbar machen. Auch die Untersuchung im Dunkelfeld eignet sich gut zur Sichtbarmachung solcher feinen Gebilde.

3b) Gefärbte Präparate. Wenn es sich darum handelt, einzelne Bakterien im Gewebe nachzuweisen, oder ihre morphologischen Verhältnisse genauer zu studieren, müssen gefärbte Präparate angefertigt werden. Das Material wird, je nach Bedürfnis, mit Wasser verdünnt, mit dem Platindraht in dünner Schicht auf einem Deckglas ausgestrichen. Man läßt es lufttrocken werden, und fixiert durch dreimaliges langsames Durchziehen durch die Flamme. Erhitzen des noch feuchten Präparates macht es mit Sicherheit unbrauchbar. Das Ausstreichen auf Objektträger ist nur für gröbere Untersuchungen zu empfehlen.

Auf das fixierte Deckglas wird die Farbflüssigkeit in möglichst reichlicher Menge aufgebracht und etwa eine Minute darauf gelassen. Dann läßt man die Farbe abtropfen und spült gründlich mit Wasser ab. Das nasse Deckglas wird auf einen Objektträger gelegt, auf der Oberseite mit Fließpapier gut getrocknet, und ist dann zum Ansehen fertig. Es wird also zunächst Wasser als Einbettungsschicht benutzt: die meisten Bakterien, besonders die größeren Arten bewahren darin ihre natürliche Form viel besser als in dem gewöhnlich benutzten Canadabalsam. Der Ersatz des Wassers durch Balsam ist aber häufig vorzuziehen, wenn es sich um Gewebsausstriche handelt, die durch Wasser wegen seines niedrigen Brechungsindex nicht genügend aufgehellt werden, und er ist nötig, wenn die Präparate konserviert werden sollen.

Das Wesen des Färbungsprozesses

ist nicht sicher bekannt. Die Hauptsache werden Adsorptionsvorgänge spielen, wenn auch die Mitwirkung chemischer Reaktionen nicht in Abrede gestellt werden soll.

Als Farbstoffe kommen für praktische Zwecke nur die Anilinfarben, und von diesen besonders Methylenblau, Fuchsin, Gentianaviolett oder auch Methylviolett, in Betracht.

Von diesen Farbstoffen färbt das Methylenblau am langsamsten, dafür aber auch am reinsten: es färbt eiweißhaltigen Hintergrund nur schwach mit und eignet sich deshalb besonders für Blut, Eiter und Gewebsausstriche. Die violetten Farben färben sehr rasch, überfärben aber leicht das Gewebe und sind deshalb besonders für Reinkulturen brauchbar. Fuchsin steht mit seinen Eigenschaften in der Mitte.

Die Farblösungen werden durch Verdünnen der konzentrierten alkoholischen Lösung der Farbstoffe mit der neunfachen Menge Wasser hergestellt.

Eine erhöhte Färbekraft, die für manche Zwecke erwünscht ist, läßt sich diesen Lösungen geben, durch Verwendung in heißem Zustande, und durch Hinzufügen gewisser Stoffe, die ein leichteres Eindringen der Farbe in die Bakterienzelle bewirken. Solche Stoffe sind Alkalien, Karbolsäure, Anilin u. a. Ausgezeichnete färberische Eigenschaften hat eine von Löffler angegebene, schwach alkalische Methylenblaulösung folgender Zusammensetzung:

Konzentrierte alkoholische Methylenblaulösung	30
Kalilauge 1:10000	100

Viel benutzt wird auch Karbolsäurezusatz, (2,5 bis 4,5%) und Anilin, dessen gesättigte wässerige Lösung mit 10% einer gesättigten alkoholischen Fuchsin- oder Gentianaviolettlösung versetzt, ganz besonders intensive Färbung bewirkt.

Für Schnittfärbung eignet sich am besten das Löfflersche Methylenblau. Die in gewöhnlicher Weise angefertigten Schnitte werden etwa 5 Minuten gefärbt, mit Wasser gespült und mit einprozentiger Essigsäure kurze Zeit behandelt. Dadurch entfärbt sich das Gewebe etwas, während die Bakterien intensiv gefärbt bleiben.

Eine Doppelfärbung läßt sich erzielen, wenn man die mit Methylenblau gefärbten Schnitte mit Eosinlösung vorsichtig nachfärbt. Das Gewebe wird dann rot, während die Bakterien blau bleiben. Die Weiterbehandlung erfolgt mit Alkohol, Xylol, Balsam, wie gewöhnlich.

4. **Färbungen für besondere Zwecke.** Gramfärbung, Sporen- und Geißelfärbung. Eine der wichtigsten Methoden der Bakteriologie ist die Färbung nach Gram. Sie beruht darauf, daß in gewissen — grampositiven — Bakterienarten gewisse Farbstoffe — Pararosaniline — durch Jodjodkaliumlösung fixiert werden, während in anderen — gramnegativen — Bakterien und den meisten Gewebsbestandteilen dabei eine Lockerung des Farbstoffes stattfindet. Durch nachfolgende Behandlung mit einer Entfärbungsflüssigkeit wird dann die Farbe aus den gramnegativen Elementen entfernt, während die grampositiven gefärbt bleiben. Die ersteren lassen sich dann mit einer Kontrastfarbe nachfärben.

Die Methode eignet sich also dazu, die grampositiven Bakterien isoliert in dem anders gefärbten Gewebe darzustellen. Sie ist außerdem ein wichtiges Hilfsmittel für die Differentialdiagnose, das besonders bei der Erkennung von Gonokokken und Meningokokken, die im Gegensatz zu den meisten anderen Kokken gramnegativ sind, gute Dienste leistet. Allerdings ist bei dieser Anwendung der Methode zu berücksichtigen, daß der Begriff der Gramfestigkeit insofern relativ ist, als durch kräftige Entfärbung und besonders durch zu intensive Einwirkung der Kontrastfarbe manche Bakterien, die sonst grampositiv sind, umgefärbt werden können.

Das gebräuchlichste Entfärbungsmittel ist Alkohol, dessen Wirkung sich durch Aceton-, noch mehr durch Säurezusatz, verstärken läßt. Schonender wirkt das von Weigert angegebene Anilin.

Worauf das verschiedene Verhalten der Bakterien beruht, ist noch nicht aufgeklärt. Wahrscheinlich spielen aber auch hier Unterschiede in der Dichtigkeit des Protoplasmas eine größere Rolle als chemische Differenzen.

Die ursprünglich von Gram angegebene Methode hat verschiedene Modifikationen erfahren. Sehr gut bewährt sich die folgende Vorschrift (nach Löffler):

Färben mit Karbolmethylviolett (9 Teile 2,5 prozentige Karbolsäure, ein Teil konzentrierte alkoholische Lösung von Methylviolett 6 B, für Pneumokokken Methylviolett BN) 2 bis 5 Minuten, Abspülen in Wasser. Jodjodkaliumlösung (ein Teil Jod, zwei Teile Jodkalium, 300 Teile Wasser) zwei Minuten. Alkohol, solange noch Farbe Zeolithe zur Unterscheidung von ähnlichen Mineralien; durch Aetzen mit Salzsäure abgeht. Nachfärben in sehr verdünnter Fuchsinlösung 15 Sekunden.

Auch für Schnitte läßt sich die Methode sehr gut benutzen; die Nachfärbung wird dann besser mit Bismarckbraun oder Safranin vorgenommen, oder der Schnitt wird vor der Grambehandlung mit Karmin gefärbt.

Von sonstigen speziellen Färbemethoden

seien noch die Färbung der Sporen, der Geißeln und Kapseln erwähnt.

Die Sporen bleiben nach den gewöhnlichen Methoden ungefärbt, weil ihre Membran das Eindringen des Farbstoffes verhindert. Ihre Färbung ist aber möglich durch Anwendung von Hitze und beizenden Zusätzen, und wenn sie auf diese Weise gefärbt sind, halten sie den Farbstoff auch bei der Einwirkung von Säuren, die vegetative Formen sofort entfärben, fest. Ebenso, wie die Sporen verhalten sich die Tuberkelbazillen und andere „säurefeste“ Stäbchen.

Fast immer führt folgendes, vom Verfasser ausprobiertes Verfahren zum Ziel:

Färben in Anilinwasserfuchsin. Das mit Farbe möglichst reichlich beschickte Deckglas wird in der Flamme des Bunsenbrenners 2 bis 3 mal zum Aufkochen gebracht, dann etwa eine Minute der Abkühlung überlassen. Abspülen in Wasser. Entfärben in 70-prozentigem, ganz schwach mit Salzsäure angesäuertem Alkohol, solange noch deutlich Farbe abgeht. Abspülen in Wasser und Nachfärben in Methylenblau. Die Sporen sind dann rot, die vegetativen Formen blau gefärbt. Sollten sich ausnahmsweise durch einfaches Aufkochen die Sporen nicht genügend färben, so kann man nach Möller, durch Behandeln mit 5 prozentiger Chromsäurelösung ihre Membran durchlässiger machen, und dann erst die Färbung anschließen.

Geißelfärbung. Auch die Geißeln der Bakterien färben sich, von vereinzelten Fällen abgesehen, mit den gewöhnlichen Methoden nicht. Sie lassen sich aber durch Vorbehandlung mit Beizen der Färbung zugänglich machen; auch kann man Silberniederschläge nach solcher Vorbehandlung auf ihnen erzeugen. Als Beizen werden nach dem Vorgange von Löffler meistens Tanninlösungen mit und ohne Zusatz von Eisensalzen, oder auch von Chromsäure verwandt, zur Färbung am besten Anilinwasserfarblösungen. Alle Methoden versagen aber manchmal scheinbar ohne Grund. Ein in allen Fällen zuverlässiges Verfahren gibt es bislang nicht. Die zum Teil recht umständlichen Rezepte müssen im Original nachgesehen werden.

Kapselfärbung. Die Färbung der Kapseln geschieht am besten so, daß die Präparate mit Methylviolett oder Gentianaviolett unter Erwärmen stark überfärbt, und dann mit einprozentiger Essigsäure vorsichtig entfärbt werden. Die Kapseln halten dabei die Farbe zurück. Auch durch vorsichtige Nachfärbung von Tuschenpräparaten (s. 3a) lassen sich die Kapseln darstellen; sie erscheinen dann als helle Höfe.

Literatur. ***Abel,*** *Bakteriologisches Taschenbuch. Würzburg 1911.* — ***Günther,*** *Einführung in das Studium der Bakteriologie mit besonderer Berücksichtigung der mikroskopischen Technik. Leipzig 1906.* — ***Heim,*** *Lehrbuch der Bakteriologie. Stuttgart 1906.* — ***Kisskalt und Hartmann,*** *Praktikum der Bakteriologie und Protozoologie. Jena 1910.* — ***Kolle und Hetsch,*** *Die experimentelle Bakteriologie und die Infektionskrankheiten. Berlin und Wien 1911.* — ***Kruse,*** *Allgemeine Mikrobiologie. Leipzig 1911.* — ***Kolle und v. Wassermann,*** *Handbuch der pathogenen Mikroorganismen. Jena 1911.*

H. Reichenbach.

D. Mineralogie, Kristallographie, Metallographie usw.

1. Untersuchung durchsichtiger Objekte. Zur mikroskopischen Untersuchung von Mineralien, künstlichen Kristallen und Gesteinen ist ein Polarisationsmikroskop mit drehbarem Tisch und mit Fadenkreuz im Okular erforderlich; für besondere Zwecke ist ihm eine Anzahl Hilfsapparate beigegeben. Die Objekte kommen je nach ihrer Art als lose Kriställchen, als Pulver oder als dünngeschliffene Blättchen von Mineralien und Gesteinen zur Untersuchung.

1a) Präparate. Die Herstellung dieser Dünnschliffe erfolgt in der Weise, daß man zunächst an den Kristall oder ein flaches Gesteinsscherbchen mit Karborund oder Smirgel und Wasser (bei Salzen mit Paraffin- oder Erdnußöl) auf einer Gußeisenplatte eine ebene Fläche anschleift, diese mit Schlammsmirgel und Wasser auf einer Spiegelglasplatte völlig glättet, das Stück dann mittels gekochten Kanadabalsams mit der angeschliffenen Fläche auf ein dickeres Schleifglas blasenfrei aufkittet, dann zuerst wieder auf der Eisen-, später auf der Glasplatte dünnschleift (Gesteine etwa bis 0,03—0,05 mm), auf einen Objektträger überträgt, in Kanadabalsam einbettet und mit einem Deckglase versieht. Bröckelige Substanzen werden nicht erst auf ein Schleifglas, sondern nach dem Anschleifen gleich auf den Objektträger gekittet. — Gesteinsdünnschliffe kommen nun entweder ohne weiteres zur Untersuchung, oder man unterzieht sie vor dem Bedecken resp. nach Entfernen des Deckglases und der oberen Balsamschicht verschiedenen vorbereitenden Maßnahmen: durch Glühen z. B. entfernt man störende Kohlensubstanz, färbt Haüyn und Cordierit deutlicher blau, trübt Cancrinit, Brucit, und Tinktion mit Fuchsin oder einem anderen Farbstoff läßt sich feinverteilter Nephelin nachweisen, durch Aetzen mit Flußsäure und Tinktion Feldspat von Quarz in feinkörnigem Gemenge unterscheiden; aus einem Tropfen Eisenchloridlösung schlägt Calcit

auf seiner Oberfläche Eisenhydroxyd nieder, während der ähnliche Dolomit klar bleibt; unter einem Tropfen Silbernitratlösung bedeckt sich der chlorhaltige Sodalith mit einer dünnen Chlorsilberhaut, der äußerlich ähnliche, aber chlorfreie Haüyn nicht u. dgl. — An den Dünnschliffen und an isolierten Kristallen läßt sich mit dem gewöhnlichen Polarisationsmikroskope eine Reihe Beobachtungen ohne weitere Hilfsmittel ausführen, wie die Feststellung der Form, der Spaltungsrichtungen, Art der Einschlüsse, Umwandlungsvorgänge, der Farbe, des Pleochroismus, des isotropen oder anisotropen Verhaltens, der Licht- und Doppelbrechung sowie der Lage der Auslöschungsrichtungen im allgemeinen, bei Gesteinen der Struktur. Für genauere Ermittelung mancher dieser Erscheinungen und für die Prüfung auf andere sind Hilfsapparate nötig.

1b) Winkelmessung. So dient zur Winkelmessung an kleinen Objekten das über dem Okular anzubringende Rochonsche Prisma (auch Leesons Prisma genannt), welches doppelte, sich zum Teil deckende Bilder liefert; durch Drehung bringt man je zwei parallele Kanten beider Bilder in eine Gerade.

1c) Bestimmung der Lichtbrechung. Stärkere oder schwächere Lichtbrechung im allgemeinen wird an breiter oder schmaler Umrißlinie, rauher oder glatter Oberfläche, Lage der hellen Beckeschen Linie innerhalb des stärker brechenden Partikels erkannt und durch Vergleich mit benachbarten Mineralien von bekannter Lichtbrechung (oder mit Kanadabalsam) angenähert zahlenmäßig bestimmt. Zur genauen Ermittelung bettet man isolierte Mineralpartikel in Flüssigkeiten von bekanntem Brechungsexponenten ein, wobei dann die Konturen des Minerals verschwinden, wenn es mit der Flüssigkeit gleiche Lichtbrechung (und gleiche Dispersion und Farbe) hat. Vorteile hierbei gewährt die Anwendung schiefer Beleuchtung durch schräggestellten Spiegel oder durch einen Schieber im Polarisator (vgl. Schroeder-van der Kolk: Anleitung zur mikroskopischen Kristallbestimmung. Wiesbaden 1898). Oder man ermittelt nach der Methode des Herzogs von Chaulnes an planparallelen Mineralblättchen von bekannter Dicke (D) den Betrag h, um welchen man den Tubus heben muß, damit ein vorher scharf eingestelltes Objekt nach dem Dazwischenschieben des Blättchens wieder scharf erscheint: $n = \frac{D}{D-h}$

1d) Bestimmung der Lage der Auslöschungsrichtungen. Die Lage der Auslöschungsrichtungen (der optischen Elastizitätsachsen) wird gewöhnlich durch Einstellen des betreffenden Minerals auf das Maximum der Dunkelheit bei gekreuzten Nicols ermittelt. Die Ungenauigkeit, welche durch die geringe Empfindlichkeit des Auges gegen kleine Unterschiede im Helligkeitsgrade bedingt wird und besonders bei schwach doppeltbrechenden Mineralien sich bemerkbar macht, umgeht man durch Einstellung auf Farbe oder auf Formen. Man bedient sich eines dünnen Mineralblättchens (meist eines Gipsblättchens) von empfindlicher Farbe (Rot 1. Ordnung), welche in gelbliche oder bläuliche Töne umschlägt, wenn das zu prüfende Mineral nur wenig von seiner Auslöschungsstellung abweicht. Empfindlicher noch wird die Methode, wenn man eine Platte zerschneidet und die Teile mit gekreuzten Achsen zu einem künstlichen Zwillinge wieder zusammenfügt. Darauf beruht die Calderonsche Calcitdoppelplatte, ein künstlicher Kalkspaltzwilling, und die Bravaissche Quarzdoppelplatte, bei der parallel zur Hauptachse geschnittene Quarzplatten so miteinander verkittet sind, daß ihre c-Achsen einen Winkel von 90° bilden. Gleiche Beschattung oder gleicher Farbenton der beiden Calcit- resp. Quarzhälften tritt nur dann ein, wenn sich das zu untersuchende Mineral in der Auslöschungsstellung befindet. In der vierteiligen Bertrandschen Quarzquadrantenplatte bestehen zwei gegenüberliegende Sektoren aus basischen Platten von rechtsdrehendem, die beiden anderen aus linksdrehendem Quarz. Alle vier Stücke zeigen nur bei vollkommener Auslöschung des zu prüfenden Minerals gleiche Farbe, sonst in je zwei aneinandergrenzenden Sektoren Farbenverschiedenheit. Zur Einstellung auf Formen benützt man eine zwischen Objekt und Analysator eingeschobene basische Calcitplatte oder eine Březinasche Doppelplatte aus zwei aneinander gekitteten, nahezu senkrecht zur Hauptachse geschnittenen Calcitplatten. In beiden Fällen wird bei Abweichung des zu untersuchenden Minerals von seiner Auslöschungslage die Calcitinterferenzfigur gestört. Alle diese Hilfsmittel dienen auch zur Feststellung sehr geringer Doppelbrechung, die ebenfalls Störungen der Farbe oder der Form hervorruft.

1e) Bestimmung des Wertes der optischen Achsen. Zur Ermittelung des relativen Wertes der optischen Elastizitätsachsen (des optischen Charakters des Minerals) dient bei Beobachtung im parallelen polarisierten Lichte das eben erwähnte Gipsblättchen vom Rot 1. Ordnung, auf welchem eine Strichmarke die Richtung der kleinsten Elastizität anzeigt. Nach Einführung in den Tubus, wobei die Marke 45° mit den Schwingungsrichtungen des Nicols bildet, zeigt das zu prüfende Mineral bei Drehung des Tisches bald höhere, bald niedrigere Farben als Rot 1. Ordnung, je

nachdem in Mineral und Gips gleichwertige oder ungleichwertige Elastizitätsachsen zur Deckung kommen. Statt des Gipsblättchens läßt sich auch ein Gips-, Quarz- oder Glimmerkeil verwenden und in gleicher Weise aus der Erhöhung oder Erniedrigung der Polarisationsfarbe schließen, welche Richtung im Mineral die der größeren, welche die der kleineren Elastizität ist. Bei Beobachtung geeigneter Mineralschnitte im konvergenten polarisierten Lichte verschwindet aus dem Achsenbilde eines optisch einachsigen Minerals das dunkle Kreuz bis auf zwei Punkte, wenn man ein Viertelundulationsglimmerblättchen in den Tubus einführt. Bei optisch negativem Charakter fallen die Punkte in die durch eine Strichmarke gekennzeichnete Achsenebene des Glimmers, bei optisch positiven Mineralien rechts und links von ihr. Wendet man statt des Glimmers das Gipsblättchen an, so erscheinen an Stelle der dunklen Punkte gelbe Flecke. Im Achsenbilde optisch zweiachsiger Mineralien verengen oder erweitern sich die Farbenringe in den abwechselnden Quadranten bei Einschaltung des Viertelundulationsglimmerblättchens; das Mineral ist optisch positiv, wenn die Achsenebene des Glimmers durch die Quadranten mit den verengerten Ringen geht, im anderen Falle optisch negativ.

1f) Bestimmung der Stärke der Doppelbrechung. Bei gleicher Dicke verschiedener Mineralien deuten höhere Polarisationsfarben auf stärkere, niedrige Farben auf schwächere Doppelbrechung. Auf der Michel-Lévyschen Farbentafel läßt sich aus der Polarisationsfarbe bei bekannter Schliffdicke der Betrag der Doppelbrechung direkt ablesen. Zur zahlenmäßigen Bestimmung dient, wenn genauere Werte gewonnen werden sollen, der Babinetsche Kompensator. Seine wesentlichsten Teile sind zwei Quarzkeile, die derart parallel zur Hauptachse aus einem Quarzkristall geschnitten wurden, daß in dem einen die optische Achse parallel, in dem anderen senkrecht zur Schneide liegt. Mit entgegengesetzt gerichteten Schneiden übereinandergedeckt erscheint bei Nullstellung des Apparates in der Mitte des Gesichtsfeldes ein beiderseits von farbigen Bändern begleiteter dunkler Streifen, welcher durch Einbringen eines doppeltbrechenden Mineralblättchens seitlich verschoben wird. Aus dem Maße der Verschiebung des einen Quarzkeils, welche nötig ist, um das schwarze Band wieder in die Mitte des Gesichtsfeldes zurückzubringen, ergibt sich der Betrag der Doppeltbrechung. Auch mit dem Fedorowschen Glimmerkeile aus treppenförmig übereinandergelegten Viertelundulationsglimmerblättchen läßt sich das Maß der Doppelbrechung bestimmen, indem man ermittelt, eine wie dicke Glimmerschicht zur Kompensation der Polarisationsfarben des zu untersuchenden Minerals erforderlich ist.

1g) Bestimmung des Achsenwinkels. Drehapparate. Zur Bestimmung des Winkels der optischen Achsen mißt man unter Benützung einer Bertrandschen Linse oder einer Kleinschen Lupe an dem in 45°-Stellung befindlichen Achsenbilde, sofern dieses vollständig im Gesichtsfelde erscheint, mittels Okularmikrometers den Abstand der beiden Hyperbelscheitel (2D) und errechnet daraus den Achsenwinkel 2E nach der Formel $\sin E = D.k$, in welcher k einen vorher an bekanntem Objekt zu ermittelnden, von der jeweils gebrauchten Linsenkombination abhängigen Faktor bedeutet. Faßt das Gesichtsfeld des Mikroskopes nicht mehr das vollständige Achsenbild, dann sind Drehapparate erforderlich, die auch für andere Zwecke, z. B. zur Bestimmung von Auslöschungskurven, Verwendung finden. Sie ermöglichen eine Drehung des Objektes außer um die Achse des Tisches noch um eine oder mehrere andere Achsen. Der einfachste dieser Apparate ist eine Glashalbkugel, welche in die Tischöffnung eingelegt wird und auf ihrer oberen, ebenen Fläche das (eventuell von einer kleineren Glashalbkugel bedeckte) Untersuchungsobjekt trägt. Er gestattet eine allseitige Drehung, aber keine Ablesung. Kompliziertere Drehapparate tragen auf einer durchbrochenen, auf den Objekttisch aufzusetzenden Fußplatte eine mit geteilter Trommel versehene horizontale Drehachse oder mit dieser verbunden noch eine weitere, auf ihr senkrecht stehende. Justiervorrichtungen sorgen für richtige Einstellung des Minerals, bei welchem man, wenn es sich um Achsenwinkelmessung handelt, beide optische Achsen nacheinander in der Mitte des Gesichtsfeldes zum Austritt bringt und die hierzu erforderliche Drehung abliest. Solche Untersuchungen können in Luft oder in kleinen Glaströgen innerhalb einer Flüssigkeit erfolgen. Der Kleinsche Drehapparat mit einer und der v. Fedorowsche Universaltisch mit mehreren Drehachsen sind am verbreitesten.

1h) Heizvorrichtungen. Heizvorrichtungen dienen dazu, die Aenderungen der optischen Eigenschaften bei Temperatursteigerung unter dem Mikroskope zu studieren. Es sind zum Teil durch Spiritus- oder Gasflamme heizbare Luftkästen mit einem Lichtloche über der Oeffnung des Objekttisches, teils Roste aus Platindraht, welcher durch elektrischen Strom erhitzt wird, beide mit Thermometer versehen und zum Aufsetzen auf den Objekttisch eingerichtet.

Bei dem Lehmannschen Kristallisationsmikroskope (vornehmlich zur Beobachtung von Kristallbildungen bestimmt) ist ein Gasheizapparat selbst als Objekttisch verwendet; Objektiv, Polarisator und andere empfindliche Teile werden durch Kühlvorrichtungen geschützt (vgl. O. Lehmann, Das Kristallisationsmikroskop, Braunschweig 1910. Eine Vorrichtung zu mikroskopischen Beobachtungen bei tiefen Temperaturen unter Anwendung von flüssiger Luft oder Kohlensäure beschrieb H. Boeke in Zeitschrift für Instrumentenkunde, 29. Jahrg. 1909, S. 72—74).

2. Untersuchung undurchsichtiger Objekte. Die mikroskopische Untersuchung undurchsichtiger Objekte, wie Erze, Eisenmeteoriten, metallographischer Produkte, erfolgt im auffallenden, reflektierten Lichte. a) Die Präparate sind kleine, eventuell mit der Metallsäge losgetrennte Platten, die man anschleift, auf rotierenden, mit feinem Smirgelpapier überzogenen Scheiben glättet und mit Polierrot auf Leder poliert. Die Oberfläche bleibt unbedeckt. b) Zur Unterscheidung der einzelnen Gemengteile und um das Gefüge besser hervortreten zu lassen sind mancherlei Methoden in Gebrauch: Reliefpolieren auf weicher Gummischeibe mit Polierrot bringt Härteunterschiede deutlicher zum Ausdruck, ebenso Hochglanzpolieren auf Spiegelglas; Anlassen, d. i. die Erzeugung von Anlauffarben bei Erhitzen an der Luft; Aetzen mit verdünnten Säuren (Salzsäure, Salpetersäure, Pikrinsäure u. a.) oder mit Ammoniumkupferchlorid. c) Zur Beobachtung unter dem Mikroskope beleuchtet man entweder das Präparat mittels einer Sammellinse oder verwendet einen Vertikalilluminator, d. i. ein über dem Objektiv in den Tubus zu schiebendes, total reflektierendes Prisma, welches das durch ein Fenster im Tubus empfangene Licht durch das Objektiv hinab auf das Präparat wirft. (Vgl. I A 1 c.) Für auffallendes Licht bei Benützung einer starken künstlichen Lichtquelle ist das horizontalliegende Mikroskop nach Le Chatelier gebaut. Das auf verstellbarem, durchbrochenem Tische mit der Schliffffläche nach unten liegende Objekt wird mittels totalreflektierender Prismen durch seitlich angesetzte Rohre von unten bebeleuchtet nnd beobachtet.

Literatur. ***H. Rosenbusch***, *Mikroskopische Physiographie der petrographisch wichtigen Mineralien, 4. Aufl. Stuttgart 1904.* — ***E. Weinschenk,*** *Anleitung zum Gebrauch des Polarisationsmikroskops, 2. Aufl. Freiburg i. Br. 1906.* — ***Derselbe***, *Die gesteinsbildenden Mineralien, 2. Aufl. Freiburg i. Br. 1907.* — ***E. Wright,*** *The methods of petrographic-microscopic research. Washington 1911.* — ***R. Reinisch,*** *Petrographisches Praktikum, 2. Aufl. Berlin 1907.* — ***Ruer***, *Metallographie in elementarer Darstellung. Hamburg und Leipzig 1907.*

R. Reinisch.

Milch.

1. Definiton des Begriffes. Milchproduktion unabhängig von Geschlecht und von Geburt. 2. Entwickelung der Milchdrüse. 3. Der Sekretionsvorgang. 4. Allgemeines über Milch. 5. Eiweißkörper. Kasein. Gerinnung und Lab. 6. Das Fett. 7. Milchzucker. Milchzuckergärung. 8. Salze. 9. Zusammensetzung bei verschiedenen Tierarten, Arteigenschaften. 10. Colostrum. 11. Frauenmilch. 12. Kuhmilch. 13. Die Milch vom wirtschaftlichen Standpunkt. 14. Die Milch als Nahrungsmittel. 15. Die Milch als Krankheitsübertrager. 16. Ziegenmilch.

1. Definition des Begriffes. Milchproduktion unabhängig von Geschlecht und von Geburt. Eine genaue und umfassende Definition des Begriffes „Milch" zu geben, ist mit Schwierigkeiten verbunden. Im allgemeinen versteht man unter „Milch" diejenige Flüssigkeit, welche die weiblichen Individuen gewisser Tierklassen kürzere oder längere Zeit durch die „Milchdrüsen" ausscheiden, nachdem sie ihre Nachkommenschaft zur Welt gebracht haben. Danach würde also Milchausscheidung eine Eigenschaft sein, die nur den weiblichen Individuen eigen ist und die zeitlich mit der Geschlechtsfortpflanzung zusammenhängt. Freilich muß man sich dabei vor Augen halten, daß ausnahmsweise a) auch männliche Individuen unter Umständen zeitweise eine milchähnliche Flüssigkeit ausscheiden können und b) die Milchsekretion auch unabhängig vom bevorstehenden oder stattgehabten Geburtsvorgang einsetzen kann. Was die Ausscheidung von Milch oder milchähnlicher Flüssigkeit anbelangt, so muß man nicht vergessen, daß die Anlage der Mammarorgane (s. u.) und auch ihre Entwickelung bis zur Geburt des Individuums und bis zum Beginn seiner Geschlechtsreife bei beiden Geschlechtern vollkommen gleich sind, ja, nach Ansicht mancher Forscher ist der Mammarapparat ursprünglich bei beiden Geschlechtern in gleicher Weise zur Entwickelung gekommen und Männlein und Weiblein haben in gleicher Weise gesäugt, bis schließlich die Weiblein sich dieser Aufgabe allein gewidmet haben: damit haben die weiblichen Mammarorgane sich weiter-, die der männlichen Individuen funktionell zurückgebildet.

Diese Auffassung würde die Tatsache ohne weiteres erklärlich machen, daß ge-

legentlich eben auch männliche Individuen Milch produzieren. Beim Menschen ist der Fall, den Humboldt beschreibt, am bekanntesten. Er sah auf einer Reise in Südamerika einen Mann, der sein Kind 5 Monate lang ausschließlich an der Brust ernährt hatte. Die Kindsmutter war gestorben und er hatte das dem Verhungern nahe Kind zur Beruhigung an seine Brust gelegt; durch das andauernde Saugen war eine Milchausscheidung zustande gekommen. Aehnliche Beispiele sind überliefert (Literatur: s. Pfaundler, Physiologie der Laktation in Sommerfelds Handbuch der Milchkunde, Verlag von J. F. Bergmann, 1909). Bei Neugeborenen findet man in den ersten Tagen und Wochen des Lebens nicht selten eine Sekretion der Brustdrüsen, die eine milchähnliche Flüssigkeit ausscheiden, und zwar ganz unterschiedslos bei Knaben wie bei Mädchen. Bei Tieren, besonders bei Ziegenböcken, wird ebenfalls gelegentlich Milchsekretion bei männlichen Individuen beobachtet.

Nach dem Gesagten ist es durchaus nicht erstaunlich, daß auch unabhängig vom bevorstehenden oder vorangegangenen Geburtsakt die Milchausscheidung in Gang kommen kann. Virginelle Laktation, d. h. Milchausscheidung beim jungfräulichen Individuum, wird gelegentlich beschrieben (Literatur: Pfaundler, Ueber virginelle Laktation, Ztschr. f. Kinderheilk., Bd. III, S. 192f.). Während der geschlechtlichen Entwickelung kommt es beim Menschen nicht selten zu einer Milchproduktion.

Trotz dieser beachtlichen und interessanten Ausnahmen kann man aber doch an der oben gegebenen Definition des Begriffes „Milch“ festhalten und die Milchproduktion praktisch als eine Sondereigenschaft des weiblichen Geschlechtes, die mit dem Geburtsvorgang in engem Zusammenhang steht, betrachten. Ja, der Vorgang, daß im Anschluß an die Geburt der Nachkommenschaft sich eine Milchproduktion einstellt und die von dem Muttertier sezernierte Flüssigkeit den Nachkommen zur Nahrung dient, hat zu der fundamentalen Einteilung der Wirbeltiere in Säuger und Nichtsäuger geführt.

2. Entwickelung der Milchdrüsen. Die Produktion der Milch geschieht in dem Mammarorgan, dessen Anlage beim jungen Säuger in die frühen Stadien seiner ontogenetischen Entwickelung zurückreicht. Seine erste Anlage findet sich in dem sogenannten „Milchstreifen“, der sich im weiteren zur „Milchleiste“ entwickelt, eine zu beiden Seiten des Körpers von der Achselhöhle zur Schenkelbeuge hinabziehende Epidermisleiste. Auf dieser Leiste erheben sich sodann stärkere Anschwellungen, die als „Milchhügel“ bezeichnet werden. Aus diesen Milchhügeln bildet sich die „Milchdrüse“ mit ihren Ausführungsorganen (siehe Schultze, Beitrag zur Entwickelungsgeschichte der Milchdrüsen, Verh. der physik. med. Gesellschaft zu Würzburg, N. F., Bd. 26 und derselbe, Ueber die erste Anlage des Milchdrüsenapparates, Anatom. Anzeiger, Jg. 8, 892. Die ganze Literatur bei Pfaundler in Sommerfelds Handbuch der Milchkunde). Bei den verschiedenen Tierarten kommt es zur Bildung mehr oder weniger zahlreicher Milchdrüsen. Während z. B. der madagaskarische Borstenigel 22 Zitzenpaare aufweist, hat das Hausschwein deren 4 bis 8. Das Rind hat 4 Zitzen; beim Menschen findet sich auf jeder Seite der Brust eine Drüse mit zahlreichen, sich in der Brustwarze (Papille) treffenden Ausführungsgängen. Ueberzählige Milchdrüsen mit mehr oder weniger entwickelten Ausführungsöffnungen, Warzen oder Zitzen finden sich bei Mensch und Tier nicht selten. Ihr Sitz und ihre Anordnung entsprechen dem Verlauf der ursprünglichen Milchleiste.

Die Milchdrüse gehört ihrem Bau nach zu den alveolären Drüsen. An den verzweigten Gängen sitzen die mit einem kubischen Epithel bekleideten Endbläschen; das Bekleidungsepithel erstreckt sich in die Ausführungsgänge hinein. Die einzelnen Drüsenläppchen sitzen in einem kernarmen interstitiellen Bindegewebe, zwischen dem mehr oder weniger reichlich Fett eingelagert ist. Während der Schwangerschaft kommt es nun zu einer sehr lebhaften Drüsensubstanzentwickelung; die Menge der Drüsensubstanz vermehrt sich um ein Vielfaches. Trotz des Wachstums der Drüse kommt es aber nicht zu eigentlicher Drüsensekretion. Diese setzt vielmehr erst ein, wenn der Geburtsakt völlig vollendet, Kind, Placenta und Eihäute ausgestoßen sind. Nach neueren Anschauungen sollen von der Frucht oder von dem Chorionepithel die Bildung bestimmter Substanzen ausgelöst werden, welche das Wachstum der Milchdrüse anregen, die eigentliche Drüsensekretion aber hintanhalten. Erst wenn die Geburt vollendet ist und die Bildung dieser sekretionshemmenden Substanz aufhört, beginnt die Drüse mit der eigentlichen Milchproduktion. Bevor es zu dieser selbst kommt, liefert die Drüse mehr oder weniger lange Zeit hindurch ein Vorprodukt der Milch, das mit dieser gewisse Eigenschaften gemein hat, sich in anderen aber von ihr unterscheidet und „Vormilch“, „Colostrum“, genannt wird (s. u.)

3. Der Sekretionsvorgang. Die Milchbildung in der Brustdrüse ist als ein echter

und spezifischer Sekretionsvorgang aufzufassen. Die Milchdrüsenzellen bauen die Milch aus den ihnen mit dem Blute zugeführten Stoffen künstlich auf. Ein Untergang von Drüsenparenchym findet nur entsprechend der normalen Abnützung aller Zellen statt. Die alte Anschauung, daß das Fett der Milch einer fettigen Degeneration der Drüsenzellen seinen Ursprung verdanke, ist als irrig erkannt. Das ausgeschiedene Fett ist Körperfett oder Nahrungsfett und das Epithel der Drüse scheidet es in der Form, in der es sich in der Milch dann findet, aus. Bei der Einleitung und Unterhaltung der Milchsekretion spielen die verschiedensten nervösen Vorgänge eine nicht zu unterschätzende Rolle. Das Saugen der Neugeborenen trägt als wirksamer Reiz zum Beginn und zum Andauern der Milchproduktion durch die Drüsenzellen wesentlich bei.

4. Allgemeines über Milch. Die Milch der verschiedenen Tierarten ist nun sehr verschiedenartig. Gemeinsam ist allen Milcharten, daß es sich um eine Flüssigkeit handelt, welche alle für die Ernährung nötigen Bestandteile enthält, welche somit außer Wasser Fett, Kohlenhydrate, Eiweiß und Salz aufweist. Erfahrungsgemäß entwickeln sich alle Säuger am besten, wenn sie mit der Milch des Muttertieres oder wenigstens eines anderen Tieres der gleichen Art aufgezogen werden. Die Zeit, welche das junge Tier ausschließlich, vorzugsweise oder nebenbei noch die Milch des Muttertieres trinkt, schwankt bei den verschiedenen Arten innerhalb weiter Grenzen, ebenso die Empfindlichkeit gegenüber der Verkürzung der normalen Stilldauer. Während manche Arten sich leicht mit Hilfe von Surrogaten ernähren lassen, gelingt es bei anderen nur selten oder mit größter Schwierigkeit, die natürliche Ernährung zu verkürzen oder zu ersetzen.

Die Verschiedenartigkeit in der Zusammensetzung der Milch steht in einem Zusammenhange zu dem Wachstume des jungen Individuums, dem es als Nahrung dient (Bunge) oder umgekehrt: das Wachstum geht entsprechend der Zusammensetzung der Milch vonstatten. Die rasch wachsenden Tierarten bedürfen der Zuführung großer Mengen von Eiweiß und anorganischen Bestandteilen, während die mit kleinem Körpervolumen und verhältnismäßig großer Körperoberfläche geborenen mehr Fett und Kohlenhydrate als gute Wärmebildner gebrauchen. So ist z. B. die Menschenmilch arm an Eiweiß und Salzen, reich an Fett und und Zucker, dagegen die Kuhmilch und noch mehr die Hundemilch eiweiß- und aschenreich. Das Wachstum des menschlichen Säuglings ist eben ein sehr langsames, während das Kalb rasch, der Hund noch viel rascher auswächst. Sehr instruktiv ist folgende Tabelle Bunges:[1])

	Das neugeborene Tier verdoppelt sein Gewicht in Tagen	In 100 Teilen Milch finden sich	
		Eiweiß	Asche
Mensch . . .	180	1,6	0,2
Pferd . . .	60	2,0	0,4
Rind	47	3,5	0,7
Ziege	22	3,7	0,8
Schaf . . .	15	4,9	0,8
Schwein . .	14	5,2	0,8
Katze . . .	9½	7,0	1,0
Hund. . . .	9	7,4	1,3
Kaninchen .	6	10,4	2,5

5. Eiweißkörper, Kasein, Gerinnung und Lab. Die Eiweißkörper der Milch sind erstlich der eigentlich spezifische Milcheiweißkörper, das Kasein, und zweitens den Eiweißkörpern des Blutes nahestehende Albumine und Globuline. Auch in dem Verhältnis dieser Eiweißkörper zueinander bestehen recht beträchtliche Unterschiede, ja, wir können direkt scheiden zwischen Kaseinmilchen, d. h. solchen, bei denen das Kasein fast die Gesamtheit des Eiweißes bildet, und Albuminmilchen, bei denen das Kasein an Menge stark im Verhältnis zu dem Albumin zurücktritt. Der Typus einer Kaseinmilch ist die Kuhmilch, während Frauen- und Eselsmilch zu den Albuminmilchen gehören.

Das Kasein, der Käsestoff der Milch, wie er sich in dieser in unverändertem Zustande befindet, ist eine an Calcium gebundene, schwache organische Säure, die zu den Nucleoalbuminen gehört. Es enthält außer C, H, N, O sowohl S als auch P, und zwar letzteres in nicht geringer Menge. Das Kasein ist somit eine jener P-haltigen Verbindungen, die wir im Pflanzen- und Tierreich überall finden, wo es sich um Vermehrung und Neuaufbau von organisierter Substanz handelt. Man gewinnt das Kasein aus der Milch, die man zweckmäßig vorher schon durch Zentrifugieren entfettet, indem man es mit verdünnter Säure, am besten verdünnter Essigsäure, ausfällt, in verdünnter Natronlauge wieder löst, wieder mit Säure fällt, im Soxhletapparat das Fett und die Wasserrückstände mit Aether auszieht. Da das Kasein sehr leicht zersetzlich ist, muß die Darstellung mit großer Vorsicht vorgenommen werden. Reines Kasein ist

[1]) Bunge, Physiol. des Menschen. Vogels Verlag, II. Band, S. 144, 1905.

ein weißes, aschefreies, wenig hygroskopisches Pulver. Die Elementaranalyse ergibt für Kaseine aus den verschiedenen Milcharten ziemlich die gleichen Werte (für Kuhkasein: C 52,69, H 6,81, S 0,832, P 0,877, N 15,65, O 23,141%), dahingegen scheint das Basenbindungsvermögen und die Löslichkeit bei verschiedenen Kaseinen verschieden. Ob die Abbauprodukte sich je nach der Tierart, von der die Milch stammt, unterscheiden, erscheint mir noch fraglich. Der Brennwert des reinen Kuhkaseins beträgt 5742 Kalorien.

In der Milch ist das Kasein nicht gelöst, sondern in kolloidalem Zustande enthalten; das Kasein läßt sich daher beim Durchpressen der Milch durch feines ungebranntes Porzellan von den übrigen Milchbestandteilen trennen. Auch hierbei muß man sich der Magermilch bedienen, da sonst die Fettkügelchen die Tonzellen verstopfen; durchgepreßt durch das Tonfilter wird alsdann die Milchmolke, d. h. alle übrigen im Milchwasser gelösten Bestandteile der Milch außer dem Fett und dem Kasein.

Eine ganz besondere Eigenschaft des Kaseins, die es auf die Milch im ganzen überträgt, ist seine Gerinnbarkeit durch Lab. Das Labferment wird in den Labzellen des Magens der verschiedenen Tierspezies gebildet. Setzt man Spuren von diesem Ferment der Milch zu, so gerinnt sie, und zwar am besten bei ca. 40°, zu einer gallertigen, festweichen Masse, ähnlich wie der Blutkuchen bei der Blutgerinnung. Aus der Milchgallerte wird, indem sich die feste weiße Masse durch Zusammenziehung verkleinert, eine gelbliche klare Flüssigkeit ausgepreßt, die Molke. Der „Milchkuchen“ besteht aus dem geronnenen Kasein, das das Fett in sich einschließt. Voraussetzung für die Gerinnung des Kaseins durch Lab ist die Gegenwart von Calcium. Versetzt man die Milch vorher mit Oxalsäure und entzieht ihr auf diese Weise den Kalk aus der Lösung, so erhält man nach Labzusatz keine Gerinnung. Fügt man jedoch wieder gelöste Kalksalze zu, so tritt die Labgerinnung wieder in ihr Recht. Durch die Labwirkung wird das Kaseinmolekül hydrolytisch gespalten, indem dabei das sogenannte Parakasein — das von seiner basischen Komponente getrennte Kasein — und ein löslicher eiweißähnlicher Körper, das sogenannte Molkeneiweiß, sich bilden. (Näheres über den Prozeß und die gesamte Literatur siehe Schlossmann und Engel, Die Milchgerinnung, in Oppenheimers Handbuch der Biochemie des Menschen und der Tiere, Bd. III, 1. Hälfte, Jena 1909.) Neben dem eigentlichen Milcheiweiß, dem Kasein, enthält die Milch 2 Eiweißkörper, die dem Globulin und dem Serumalbumin des Blutes nahe verwandt sind, nämlich das Lactalbumin und das Lactoglobulin. Das Lactalbumin stellt man nach Sebelin am besten dar, indem man Kuhmilch mit Bittersalz versetzt und im Filtrate mit verdünnter Essigsäure das Lactalbumin ausfällt. Es zeigt Eigenschaften, die dem Serumalbumin völlig entsprechen. Der Gehalt an Lactalbumin und das Verhältnis von Lactalbumin zum Kasein sind in den Milchen der verschiedenen Tierarten ganz verschieden. Das Lactoglobulin ist von untergeordneter Wichtigkeit. Verschiedene Untersucher haben endlich noch weitere Eiweißkörper in der Milch mehr oder weniger regelmäßig isolieren zu können geglaubt, doch handelt es sich dabei zumeist um künstliche Spaltungsprodukte der wirklich präformierten Eiweißkörper. Auch über das Vorkommen von Lecithinen in der Milch schwanken die Ansichten außerordentlich. Alle möglichen stickstoffhaltigen Extraktivstoffe finden sich gelegentlich oder auch regelmäßig in der Milch in geringen Mengen, so vor allem etwas Harnstoff.

6. Das Fett. Das Fett findet sich in der Milch suspendiert in Gestalt von kleinen und kleinsten Tröpfchen; die Größe dieser Tröpfchen schwankt innerhalb weiter Grenzen bei den verschiedenen Tierarten. Die Fetttröpfchen bestehen aus gemischten Triglyceriden, Spuren Cholesterin und einem Fettfarbstoff. Durch längeres Stehen, resp. durch Zentrifugieren kann man die Fetttröpfchen aus der Emulsionsform, in der sie in der Milch sich finden, an der Oberfläche sammeln. Diesen fettreichen Teil der Milch nennt man Rahm oder Sahne. Frische Milch enthält keine freien Fettsäuren; kommen solche vor, so sind sie das Produkt einer stattgehabten Zersetzung des Fettes. Man stellt das Fett dar, indem man die Milch oder besser noch die Sahne mit einigen Tropfen Kalilauge versetzt und dann mit Aether gründlich ausschüttelt. Auch durch Ausziehen in einem Extraktionsapparat — sei es der getrockneten Milch, sei es der Flüssigkeit selber — vermittels Aether oder einer anderen fettlösenden Substanz kann man das Milchfett — die Butter, rein gewinnen. In der Landwirtschaft geschieht die Gewinnung des Milchfettes durch Schlagen der leicht angesäuerten Sahne im Butterfasse.

Das Fett ist der wertvollste Bestandteil der Milch vom Ernährungsstandpunkt aus, indem je ein Gramm Fett einen Brennwert von rund 9300 Kalorien hat, auch das Fett ja restlos bis in seine Endkomponenten CO_2 und H_2O im Organismus verbrannt wird. Die Feststellung des Fettgehaltes einer Milch ist daher praktisch von großer Bedeutung und eine der am meisten ausgeführten chemischen Untersuchungen. Zahlreiche Apparate sollen einer raschen und sicheren Fettbestimmung dienen. Am

verwandt wird die aräometrische Methode Soxhlets, der aus dem spezifischen Gewicht der Aetherfettlösung aus einer bestimmten Milchmenge den Fettgehalt ermittelt oder neuerdings die Gerbersche Acidbutyrometrie, bei der nach Versetzung einer bestimmten Milchmenge mit konzentrierter Schwefelsäure das Fett in Amylalkohol gelöst und volumetrisch die Fettmenge nach gründlichem Zentrifugieren abgelesen wird (genaue Angaben in allen Lehrbüchern der Nahrungsmittelchemie, auch sehr gut bei Reiß und Sommerfeld. Handbuch der Milchkunde, S. 253ff. Literatur daselbst).

Der Fettgehalt schwankt bei der Milch der verschiedenen Tierarten, ebenso innerhalb der verschiedenen Tierarten bei den verschiedenen Rassen und den verschiedenen Individuen. Er ist sehr konstant bei ein und demselben Individuum, selbst bei verschiedener Ernährung und in verschiedenen Laktationsperioden. Bei Entnahme der Milch aus der Milchdrüse, sei es auf natürlichem Wege durch Saugen des Jungen, sei es bei künstlicher Entleerung durch Melken, sind die ersten Portionen fettarm, die späteren immer fettreicher.

7. Milchzucker. Milchzuckergärung. Das Kohlehydrat der Milch ist der Milchzucker, ein Disacharid, aus Traubenzucker und Galactose zusammengesetzt. Der Milchzucker findet sich in den übrigen Nahrungsmitteln nicht; er wird daher erst im Organismus des säugenden Tieres aus den anderen Kohlehydraten synthetisch aufgebaut. Beachtlich ist die Tatsache, daß alle Säugetiere ihrem Nachwuchs in der Milch Milchzucker vorsetzen, ohne daß man bisher experimentel ermittelt hätte, worauf nun die Ueberlegenheit des Milchzuckers als Nahrungsmittel für das junge Säugetier eigentlich beruht.

Der Milchzuckergehalt ist ebenfalls bei verschiedenen Tierarten und auch innerhalb derselben Art bei verschiedenen Individuen schwankend. Milchzucker wird bestimmt gewichtsanalytisch nach dem Verfahren von Soxhlet, indem man Kupferoxyd reduziert oder refraktrometrisch mittels des Zeißschen Milchfettrefraktrometers.

Der Milchzucker ist leicht zersetzbar. Weit verbreitete saprophytische Mikroorganismen führen dazu, daß der Milchzucker in der Milch nach vorhergegangener Hydratation in Milchsäure gespalten wird. Die so entstehende Milchsäure führt zur Spaltung und Ausfällung des Kaseins, also zu dem sogenannten Sauerwerden der Milch, bei dem der Käsestoff niederfällt. Aber auch für alkoholische Gärung in der Milch gibt der Milchzucker das Material ab, freilich erst nach Spaltung des Disacharides in seine beiden Komponenten. Die alkoholische Gärung wird durch verschiedene Hefearten eingeleitet. Künstlich stellt man an verschiedenen Orten aus Milch gegorene Getränke her durch Verimpfung spezifischer Hefearten, so Kefir, Kumys und neuerdings vielfach Joghurt. Neben der alkoholischen Gärung findet dabei eine Fruchtesterbildung statt.

8. Salze. An Salzen finden sich in der Milchasche, deren Gehalt ebenfalls bei den verschiedenen Milcharten recht verschieden ist, regelmäßig K, Na, Ca, Mg, Fe, Spuren Mangan, Aluminium und Fluor, ferner P_2O_5, Cl, CO_2, H_2SO_4.

9. Zusammensetzung der Milch bei verschiedenen Tierarten, Arteigenschaften. Ueber die Zusammensetzung der Milch der verschiedenen Tierarten und den Aschegehalt gibt die Tabelle Auskunft.

Chemische Zusammensetzung der Milch verschiedener Milcharten nach Raudnitz (Handb. d. Milchkunde von Sommerfeld).

Tierart	Spez. Gewicht	Wasser %	Kasein %	Anderes Eiweiß %	Fett %	Zucker %	Asche %
Kuh	1,028 1,034	88	3	0,3	3,4	4,4	0,7
Ziege . . .	1,032	86,2	3,8	1,02	4,8	4,6	0,85
Büffel . . .	1,033	82,16	4,1	0.6	7,5	4,8	0,84
Schaf . . .	1.035	83,57	4,17	0,98	6,18	9,17	0,93
Kamel . . .	—	87	3,87	0,4	2.9	5,4	0,74
Pferd . . .	1,035	90	2		2,2	6,0	0,36
Esel	1,032	90	0,8	1,0	1.3	6,0	0,47
Schwein . .	1,033—1,045	84	2,7	1	5	5	0,63
Hund . . .	—	77	4.15	5,57	9,26—	3,11	0,91
Katze . . .	—	81,6	3,12	5.96	15.54	5.0	0,58
					3,3		
Kaninchen .	1,047	69,5	10,4	15.5	16,7—21,0	2,0	2,56
Meerschwein	—	—	11,2		45,8	1.4	—
Mensch . .	1,032	78,1	0,6	4,0	0,6	7.5	0,2

Aschengehalt der Milch nach Bunge (Lehrbuch d. Physiologie, Bd. 2, S. 143).

	Mensch	Hund	Kaninch.	Meerschwein	Schwein	Pferd	Rind	Ziege	Schaf
K_2O . . .	0,780	1,41	2,5	0,75	0,99	1,05	1,77	1,3	1,00
Na_2O . . .	0,232	0,81	2,0	0,70	0,74	0,14	1,11	0,6	0,89
CaO . . .	0,328	4,53	8,9	2,42	2,40	1,24	1,60	2,0	2,52
MgO . . .	0,064	0,20	0,6	0,24	0,14	0,13	0,21	0,16	0,15
Fe_2O_3 . .	0,004	0,02	0,02	0,013	0,042	0,02	0,004	0,04	0,04
P_2O_5 . . .	0,473	4,93	10,0	2,88	3,00	1,31	1,97	2,91	3,00
Cl	0,438	1,63	1,4	1,00	0,67	0,31	1,70	1,0	1,34

Was den Einfluß der Ernährung auf die Zusammensetzung der Milch anbelangt, so hat man diesen wesentlich überschätzt. Voraussetzung ist natürlich, daß die Nahrung eine auskömmliche ist, die den Anforderungen des mütterlichen Organismus an und für sich und den durch die Milchabgabe hierüber noch gesteigerten entspricht. Ist die Nahrung aber eine genügende und zweckmäßig zusammengesetzt, so wird eine Steigerung der einzelnen Komponenten durchaus nicht zu einer Veränderung der Milchzusammensetzung führen.

Neben den grob-chemisch wahrnehmbaren Unterschieden zwischen der Milch der verschiedenen Tierarten kennen wir aber noch eine ganze Reihe interessanter Tatsachen, welche es immer mehr und mehr augenscheinlich gemacht haben, daß der Milch jeder Art ihre ganz bestimmten Arteigenschaften anhaften; wir sprechen daher von arteigener und artfremder Milch. Die Erkenntnis dieser Dinge nimmt ihren Ausgang von grundlegenden Versuchen Bordets. Dieser fand folgendes: wenn man einem Kaninchen eine geringe Menge roher Milch eines bestimmten Tieres, z. B. der Kuh, unter die Haut spritzte, so erwarb das so behandelte Kaninchen die merkwürdige Eigenschaft, daß das Serum seines Blutes das Eiweiß der Kuhmilch fällte, Ziegenmilch, Eselsmilch, Frauenmilch u. a. m. wurden aber nicht beeinflußt. Umgekehrt, wurde das Kaninchen mit roher Frauenmilch vorbehandelt, so wurde nur Frauenmilcheiweiß durch das Serum dieses Kaninchens gefällt, nicht aber das Eiweiß anderer Milcharten. In der Milch müssen somit arteigene Substanzen vorhanden sein, die auf das Blutserum eines Tieres, dem sie einverleibt werden, derart kräftig und spezifisch einwirken, daß es ganz bestimmte neue Eigenschaften, wie die der präzipitierenden Wirkung gewinnt.

Die weitere Entwickelung der Forschung gerade auf diesem Gebiete hat nun in immer wachsendem Maße zu der Erkenntnis geführt, daß die biologischen Unterschiede zwischen den verschiedenen Milcharten sicherlich noch bedeutendere sind als die chemischen.

Damit ergab sich aber zugleich, daß die Verabreichung der arteigenen Nahrung für das heranwachsende Junge von der allergrößten Bedeutung sein mußte. Es kam weiter hinzu, daß wir durch die Arbeiten Ehrlichs gelernt haben, daß auch die sogenannten Immunitätsträger durch die Milch von der Mutter auf das Junge übermittelt werden können.

Diese Eigenschaften der Milch gehen aber natürlich beim Kochen verloren, da ja die in Betracht kommenden Substanzen größtenteils thermolabil sind.

10. Colostrum. Bevor wir uns zur näheren Betrachtung der Milch einzelner Tierarten, vor allem der Menschen- und Frauenmilch wenden, muß noch einiges über die Vormilch, das Colostrum, nachgetragen werden. Wie schon erwähnt, scheidet die Milchdrüse ein Vorprodukt, das Colostrum aus, bevor die eigentliche Milchproduktion beginnt. Im Gegensatz zur eigentlichen Milch ist das Colostrum zellreich; es enthält die sogenannten Colostralkörperchen, mit Fetttröpfchen reich beladene Zellen. Colostrum gerinnt nicht bei Labzusatz, wohl aber koaguliert es beim Kochen. Der Grund hierfür ist die Armut an Kasein und der Reichtum an Albumin und vor allem Globulin. Biologisch finden sich im Colostrum Komplementstoffe in erheblicher Menge, so daß sie direkt zum Nachweis des Colostralcharakters einer Milch herangezogen werden können. Die Entwickelung des Colostrums zur eigentlichen Milch dauert bei den verschiedenen Tierarten verschieden lange.

Nach der Besprechung der allgemeinen Eigenschaften der Milch wenden wir uns nunmehr im speziellen denjenigen beiden Milcharten zu, welchen die größte praktische Bedeutung zukommt, nämlich der Frauenmilch und der Kuhmilch.

11. Frauenmilch. Die Frauenmilch hat im allgemeinen einen leichten Stich ins Gelbliche gegenüber der Kuhmilch, ist im übrigen eine undurchsichtige weiße Flüssigkeit; sie schmeckt süßer als Kuhmilch und infolge geringeren Salzgehaltes etwas fader. Mikroskopisch betrachtet überwiegen kleine und kleinste Fettkügelchen. Das spezifische Gewicht beträgt gegen 1,032; die Reaktion

ist amphoter, gegen Phenolphthalein sauer, gegen Lackmus alkalisch infolge ihres Gehaltes an Monophosphaten und an Biphosphaten nebeneinander. Der Stickstoffgehalt sinkt während der Dauer der Laktation bis zu einem gewissen Minimalpunkt, bei dem sich dann die Milch der Frau in der Zusammensetzung dauernd gleichmäßig erhält (Gesamt-N etwa 0,29 g am Anfang und 0,21 g in der vorgeschrittenen Lactation in 100 cbm). Der Eiweißgehalt beträgt dementsprechend 1,8 bis 1,3 %.

Die Eiweißkörper bestehen etwa zu gleichen Teilen aus Kasein einerseits und Albumin + Globulin andererseits. Der Fettgehalt ist hoch, etwa 4 bis 4,5 %, ebenso der Zuckergehalt, der 7 bis 7,5 % ausmacht. Die Gerinnung der Frauenmilch durch Säure ist viel feinflockiger als die der Kuhmilch, sie hat ein viel beschränkteres Aciditäts-Optimum. Die Gesamtasche beträgt 0,21 %. Der Brennwert der Frauenmilch schwankt je nach dem Fettgehalt zwischen 718 bis 812 Kalorien.

Wesentliche Aenderungen haben die Anschauungen über die Menge der Milch, welche die einzelne Frau produzieren kann, sowie über die Milchproduktionsfähigkeit des Weibes überhaupt erfahren. Ein weitgehender, völlig unberechtigter Pessimismus hatte nämlich eine zunehmende Stillunfähigkeit der Frau feststellen zu müssen geglaubt. In der Tat zeigt es sich aber, daß vom physischen Standpunkte aus fast alle Frauen in der Lage sind, die zur Ernährung ihres Kindes nötige Milchmenge zu produzieren. Ja, nicht wenige Frauen sind in der Lage, ein Mehrfaches und ein Vielfaches der Milchmenge hervorzubringen, die zur Ernährung eines Kindes nötig ist. 2 bis 3 Liter, ja auch 4 und 5 Liter Milch als Tagesmenge sind durchaus keine Seltenheiten. Im allgemeinen entspricht dem gesteigerten Saugreize bei erhöhter Inanspruchnahme eine erhöhte Leistung der Drüse. Auch gelingt es, die Sekretion bei der Frau sehr lange in Gang zu halten. Während bei uns jetzt in der Regel die Stilldauer nur $^3/_4$ bis 1 Jahr beträgt, stillen in anderen Ländern die Frauen beträchtlich länger, 2, 3 und wohl gelegentlich noch mehr Jahre. Vereinzelt sieht man auch bei uns solche in die Länge gezogene Milchproduktion.

12. Kuhmilch. Als Ersatz für die Frauenmilch und als überaus wichtiges Nahrungsmittel überhaupt kommt bei uns die Kuhmilch in Betracht.

Kuhmilch ist eine Flüssigkeit von gelbweißer bis bläulichweißer Färbung und einem spezifischen Gewicht, das zwischen 1,0298 und 1,0312 liegt. Entscheidend ist Fett- und Salzgehalt, da der Eiweißgehalt und der Zuckergehalt relativ am konstantesten sind. Der Fettgehalt der Kuhmilch beträgt im großen Durchschnitt 3,4 %; er schwankt mit der Rasse und ist auch individuell unterschiedlich. Höhenvieh hat im allgemeinen weniger Milch mit mehr Fett, Niederungsvieh mehr Milch mit weniger Fett. Eine Kuh liefert am Tage 10 bis 15 bis 20 bis 30 bis 40 Liter Milch; im Durchschnitt rechnet man 15 Liter. An Kasein enthält Kuhmilch 3 %, an Albumin und Globulin 0,3 %, Milchzucker 4,5 %, Asche 0,7 %. Die Trockensubstanz der Milch beträgt 12 %.

13. Die Milch vom wirtschaftlichen Standpunkt. Kuhmilch gehört wirtschaftlich zu den wichtigsten Produkten, die in Deutschland geschaffen werden. Der Wert der gesamten Milchproduktion im Deutschen Reiche ist jährlich auf 1800 bis 2000 Millionen zu schätzen. Die Zahl der Milchkühe betrug im Jahre 1900 über 10 Millionen und stellt einen Wert von mindestens 3000 Millionen dar. Auf 100 Einwohner kommen 18,6 Kühe. Der Milchbedarf des einzelnen beläuft sich auf $^1/_4$ bis $^1/_3$ Liter pro Kopf. Infolge der Industrialisierung einzelner Teile Deutschlands ist strichweise die Milchproduktion zurückgegangen, in anderen Landesteilen wieder gestiegen. Damit kommen wir mehr und mehr einerseits zu menschenreichen und milcharmen Bezirken und auf der anderen Seite zu menschenarmen und milchreichen Gegenden. Den nötigen Ausgleich zu schaffen ist nicht leicht, weil infolge der Unsauberkeit der ländlichen Betriebe die Haltbarkeit der Milch eine sehr geringe ist. Je schmutziger die Milchgewinnung ist, um so leichter ist sie der Milchsäurebildung ausgesetzt. Von großem Einfluß auf diesen Prozeß ist die Außentemperatur. Je wärmer die Milch gehalten wird, desto rascher zersetzt sie sich. Reinliche Gewinnung, sofortige Kühlung und Transport und Aufbewahrung bei tiefliegender Temperatur ermöglichen eine sehr lange Haltbarkeit der Milch. Der Preis für eine anständig behandelte Milch schwankt zwischen 20 bis 25 Pf., bei aseptischer Gewinnung und einer den höchsten Anforderungen genügenden Stallhygiene wird mancherorts Milch produziert, für die bis 1 M. pro Liter bezahlt wird.

14. Die Milch als Nahrungsmittel. Die Milch wird nicht nur in rohem und gekochtem Zustande genossen, sondern dient auch zur Butter- und Käsebereitung. Der Nährwert der Milch ist ein großer: 1 Liter Milch hat ca. 600 Kalorien Brennwert. Bei einem Preis von 20 bis 25 Pf. pro Liter ist Milch somit auch ein sehr billiges Nahrungsmittel. Das gilt besonders von der Magermilch. Da die fetten Bestandteile als Sahne und Butter erhöhten Absatz haben und daher über den eigentlichen Wert bezahlt werden, ist die Magermilch vielfach so billig zu kaufen, daß

sie für die Ernährung gar nicht genug empfohlen werden kann. Ausschließliche oder vorwiegende Milchernährung ist bei Kindern jenseits der ersten 8 Monate unzweckmäßig und zu widerraten.

15. **Die Milch als Krankheitsüberträger.** Das Milchvieh in Deutschland ist zahlreichen Krankheiten unterworfen, die unter Umständen auf den Menschen übertragen werden können, so z. B. ist die Tuberkulose unter den Kühen sehr verbreitet. Auch andere Krankheiten, z. B. Typhus, werden durch die Milch verschleppt.

16. **Ziegenmilch** ist in der Zusammensetzung der Kuhmilch ganz ähnlich; die Ziege gibt 2 bis 3 bis 5 bis 6 Liter täglich. Ziegenhaltung ist wegen der Anspruchslosigkeit dieser Milchtiere und der Sauberkeit, mit der sich die Milch gewinnen läßt, sehr zu empfehlen.

Literatur. *Ueber alle Fragen gibt am besten das Handbuch der Milchkunde, unter Mitarbeitung zahlreicher Fachmänner, von* ***Sommerfeld*** *herausgegeben, Auskunft. 1909. — Weiter ist die Literatur gut zu finden in* ***Raudnitz und Busch,*** *Chemie und Physiologie der Milch. Ergebnisse der Physiologie Bd. II, 1903 —* ***Bauer und Engel,*** *Biologie und Chemie des Colostrums. — Ebenda Bd. XI, 1906. Ferner in den jährlichen Zusammenstellungen von* ***Raudnitz*** *in der Monatsschrift für Kinderheilkunde.*

A. Schlossmann.

Miller
William Hallowes.

Geboren am 6. April 1801 zu Velindre bei Llandovery (Carmarthenshire); gestorben am 20. Mai 1880 zu Cambridge. Miller, Sohn eines Hauptmanns, erhielt den ersten Unterricht in Privatschulen, studierte dann am St. Johns College in Cambridge. Er bestand 1826 die mathematische Ehrenprüfung und wurde 1829 zum Mitglied (fellow of the college) ernannt. 1832 wurde er dort Professor der Mineralogie und erhielt 1841 den M. D. (Medicinae Doctor). 1838 wurde er zur Royal Society zugelassen, 1865 von Dublin zum L. L. D. (Legum Doctor) ernannt, 1874 von seinem College zum Fellow wieder gewählt, 1876 von Oxford zum D. C. L. (Doctor of Civil Law) gemacht. Nach einem Schlaganfall im Herbst 1876 begann seine Gesundheit zu schwinden.

Miller zeichnete sich besonders aus als Kristallograph durch Entwickelung und Anwendung der stereographischen Methode und der Indicesbezeichnung der Formen (Millersche Schreibweise vgl. Kobell Gesch. d. M. S. 228). Er war 1870 auch Mitglied der internationalen Meterkommission.

Wesentliche Werke (ausführliches Verzeichnis bei Poggendorff 2. 151 und 3. II. 915): 1831 The elements of hydrostatics and hydrodynamics; 1839 A treatise on crystallography; 1852 Neu-Ausgabe (mit H. J. Brooke) von W. Phillips: An elementary introduction to Mineralogy; 1863 A tract on crystallography.

Literatur. *Memorial by Mrs. Miller (Privatdruck) — Proc. Royal Society No. 206, 1880. —* ***Maskelyne,*** *Nature XXII, 247. — Dictionary of National Biography (S. Lee) 1894, XXXVII, 430.*

K. Spangenberg.

Milne-Edwards
Alphonse.

Er ist der Sohn von Henry Milne-Edwards und den 13. Oktober 1835 zu Paris geboren, wo er auch am 21. April 1900 starb. Er studierte in Paris Medizin und promovierte 1860 zum Doktor der Medizin, 1861 auch zum Doktor der Philosophie. Schon 1859 wurde er Assistent seines Vaters und 1865 Professor an der Hochschule für Pharmazie. 1876 erhielt er den Lehrstuhl seines Vaters und wurde 1891 Direktor des Museums in Paris. Er war von 1880 bis 1883 Mitglied der Tiefseeexpedition des Travailleur und Talisman im Mittelmeer und im östlichen Atlantischen Ozean, auch war er später Begleiter des Fürsten von Monaco auf dessen wissenschaftlichen Seereisen. Seine ersten wissenschaftlichen Arbeiten liegen auf dem Gebiete der reinen Physiologie; er arbeitete über die Größe der Blutkörperchen und besonders über den Einfluß des Gehalts der Nahrung an phosphorsauren Kalk auf die Kallusbildungen. Später wandte er sich ganz der Säugetieranatomie, der allgemeinen Zoologie und auch der Paläontologie zu, wovon zahlreiche Arbeiten Zeugnis ablegen. Hier seien nur die wichtigsten erwähnt: Influence de la proportion de phosphate de chaux contenu dans les aliments sur la formation du callus 1858; Etudes chimiques et physiologiques sur les os 1860; Recherches anatomiques, zoologiques et paléontologiques sur la famille des chevrotains 1864; Recherches anatomiques et paléontologiques pour servir à l'histoire des oiseaux fossiles de la France, 1866 bis 1872, 2 Bde.; Recherches sur la faune ornithologique éteinte des îles Mascareigues et de Madagascar, 1866 bis 1873; Elements de l'histoire naturelle des animaux, 1881 bis 1882, 2 Bde.; Crustacés décapods. Mit Bouvier, 1901. Ferner gab er heraus: Expeditions scientifiques du Travailleur et du Talisman, 1888 bis 1898, 5 Bde., und bearbeitete die Säugetiere und Vögel für Grandidiers Werk über Madagaskar 1875 bis 1889.

Literatur. *Grande Encyclopedie, Paris.*

W. Harms.

Milne-Edwards
Henry.

Geboren am 23. Oktober 1800 zu Brügge; gestorben 1886 in Paris. Studierte Medizin in Paris und wurde zum Professor der Naturgeschichte am Collège Henri IV daselbst ernannt; 1838 folgte er Cuvier als Mitglied der Akademie und wurde 1841 Professor der Entomologie am Museum.

1862 zum Professor der Zoologie ernannt, übernahm er nach Etienne Geoffroys Tode die höheren Wirbeltiere an dieser Anstalt, deren stellvertretender Direktor er seit 1864 war. In seinen wissenschaftlichen Arbeiten, die namentlich die vergleichende Anatomie und Zoologie behandelten, lehnte er sich anfänglich vollständig an Cuvier an. Das Hauptwerk von ihm bleiben die Lessons de Physiologie et d'anatomie comparée, 1857 bis 1883, worin nicht nur die Erfahrungen der gesamten Zootomie sorgfältig und kritisch abgestuft vor uns treten, sondern auch in glückliche Verbindung mit der Physiologie gebracht werden. Auch hat er ein vorzügliches Lehrbuch für die französischen Schulen verfaßt. Seit 1837 gab er den zoologischen Teil der Annales des sciences naturelles heraus. Von seinen weiteren Arbeiten sind noch zu nennen: Recherches anatomiques sur les crustacés, 1835; Eléments de zoologie, 1835; Histoire naturelle des crustacés, 3 Bde., 1837 bis 1841; Cours élémentaire de zoologie, 11. Aufl., 1871; Introduction à la zoologie générale, 1853; Histoire naturelle des coralliaires, 3 Bde., 1858 bis 1860; Recherches pour servir a l'histoire naturelle du littoral de la France, 3 Bde., 1832 bis 1845. Im Verein mit seinem Sohne Alphons gab er heraus: Recherches pour servir à l'histoire naturelle des mammifères, 2 Bde., 1864 bis 1874; und Leçons sur la physiologie et l'anatomie comparées de l'homme et des animaux, Bd. I bis XI, 1855 bis 1876.

Literatur. ***Berthelot***, *Eloge de Milne-Edwards, Academie des sciences déc. 1891.*

W. Harms.

Mimicry.

Mimicry ist die Erscheinung, daß andere Tiere, Pflanzenteile oder sonstige Gegenstände von Tieren nachgeahmt werden (vgl. den Artikel „Deszendenztheorie").

Mineral- und Gesteinsbildung
aus dem Schmelzfluß (Magma) und durch Pneumatolyse.

1. Einleitung. Die Untersuchungen über die Gesetzmäßigkeiten bei der Bildung von Mineralen und Gesteinen aus dem Schmelzfluß werden nach zwei wesentlich verschiedenen Verfahren betrieben, erstens nach der analytisch-statistischen, zweitens nach der synthetisch-experimentellen Methode.

1a) Die analytisch-statistische Untersuchungsmethode der magmatischen Vorgänge, die bis vor kurzem nahezu die einzig herrschende war, sucht aus den jetzt verfestigt und abgekühlt vorliegenden Gesteinen die Gesetze ihrer Bildung aus dem Schmelzfluß abzuleiten. Als eine rein deduktive ist diese Methode mit Unsicherheit behaftet und die petrographische Literatur der letzten Jahrzehnte zeigt deutlich, in welche Schwierigkeiten man gerät, sobald man die Vorgeschichte der Gesteine aus dem Endresultat herleiten will. Auch ist aus den wenigen exakten synthetischen Schmelzuntersuchungen, die bis jetzt ausgeführt wurden, schon ersichtlich, daß die Vorgänge bei der Erstarrung und weiteren Abkühlung einschlägiger Gemische viel zu verwickelt sind, um aus dem Endprodukt mit einiger Sicherheit deduziert werden zu können. Ferner sind bei der natürlichen Mineral- und Gesteinsbildung eine Reihe von Faktoren wirksam gewesen, die wir nicht kennen und die auch oft die Einstellung von Gleichgewichten verhindert haben, d. h. die Ausbildung des unter den gegebenen Umständen stabilsten Zustandes im System. Deduktionen, die in einem Fall zutreffen, können daher in analogen Fällen zu Widersprüchen führen.

Um einigermaßen sicher zu gehen, muß die analytische Methode mithin statistisch betrieben werden, aus einer möglichst großen Anzahl ähnlicher Fälle sind die übereinstimmenden Momente abzusondern. Aber auch dann gewinnt die analytische Erforschung der Mineral- und Gesteinsgenese erst ihren großen Wert, wenn sie als Ergänzung der jetzt zu besprechenden synthetisch-experimentellen Untersuchungen ausgeführt wird.

1b) Die synthetisch-experimentelle Methode. Schon um die Mitte des vorigen Jahrhunderts wurde namentlich von einer großen Reihe französischer Forscher die Synthese vieler Minerale ausgeführt. Ihre Ergebnisse haben viel zur Deutung der magmatischen Erstarrungsvorgänge beigetragen, sind aber über den qualitativen Standpunkt nicht hinausgekommen und vielfach im präparativen Stadium stehen geblieben. Erst in allerneuester Zeit sind sowohl die physikalisch-chemischen Grundlagen wie auch die technischen Hilfsmittel zur Erreichung und exakter Messung hoher Temperaturen so weit gediehen, daß man imstande ist, die quantitativen Gesetze der magmatischen Erstarrung durch das Experiment zu erforschen.

Bei derartigen Untersuchungen ist es von besonderer Wichtigkeit, chemisch reines Material zu verwenden. Während man im Anfang der Arbeiten auf diesem Gebiet mit Vorliebe von natürlichen Mineralen

ausging, um in engerer Fühlung mit der Natur zu bleiben, ist man von diesem Verfahren jetzt gänzlich abgekommen. Minerale tragen fast immer durch Beimischungen, Einschlüsse und wechselnde Zusammensetzung infolge von Mischkristallbildung einen unbestimmten Charakter. Unter Benutzung solcher Grundstoffe gewonnene Ergebnisse würden in den meisten Fällen keine allgemeine Bedeutung haben.

Ein weiterer allgemeiner Gesichtspunkt ist der, daß man danach strebt, die Experimente unter genau bekannten und zunächst möglichst einfachen Verhältnissen anzustellen. Bei einem solchen Vorgehen wird man schrittweise die Anzahl der bestimmenden Faktoren vermehren können und auf diese Weise allmählich den verhältnismäßigen Einfluß der mannigfachen und verwickelten Ursachen, welche die Bildung der Gesteine zur Folge hatten, kennen lernen. Vor allem sucht man zunächst die Gleichgewichtserscheinungen, welche die Genese der Minerale und Gesteine beherrschen, genau festzustellen. Die Abweichungen vom Gleichgewicht bei den natürlichen Vorgängen wird man erst voll verstehen können, wenn der Idealfall, ein vollständig erreichtes Gleichgewicht, in Einzelheiten erforscht ist.

2. Allgemeines über das Magma und seine Verfestigung. Die petrographischen Betrachtungen gehen meist von dem Vorhandensein bestimmter Magmenbassins in der Erdrinde aus. Wie sich derartige begrenzte Schmelzflußreste haben erhalten können, oft sogar so nahe an der Erdoberfläche, daß sie damit jahrhundertelang in dauernder oder periodischer Verbindung stehen (Vulkane), entzieht sich unserer Kenntnis. Eine weitere noch ungelöste Frage ist die Ursache der chemischen Differenzierung der Magmen und der daraus hervorgehenden Gesteine. Einerseits weisen die Eruptivgesteine eine deutliche räumliche Verschiedenheit auf, andererseits aber ist eine unverkennbare Verwandtschaft in den einzelnen petrographischen Gauen, besonders in Bezug auf chemische Zusammensetzung und damit verknüpfte Mineralführung, vorhanden.

Lange Zeit hat man geglaubt, einen Spaltungsvorgang im flüssigen Magma annehmen zu müssen, wenn auch diese Erklärungsweise rein deduktiv, durch kein Experiment gestützt war. Noch jetzt vertreten namhafte Petrographen diese Ansicht, während andere nur eine Differenzierung der Gesteine als Folge von Kristallisationsprozessen annehmen wollen. Ebenso wie sich in jeder Wissenschaft die Probleme der ersten und allgemeinsten Ursachen am schwersten lösen lassen, ist es auch der Gesteinskunde bis jetzt nicht gelungen, hier eine befriedigende Antwort zu geben.

Eine wichtige Analogie ist in den letzten Jahrzehnten bekannt geworden, und zwar in einem Gebiet, wo die besser zu übersehenden Verhältnisse eine sichere Deutung zuließen. Denken wir uns eine glühend flüssige, noch im großen und ganzen einheitliche Urlithosphäre und vergleichen wir diese mit dem abgetrennten Teile des Zechsteinozeans, der bei seiner Verdunstung die Kalisalzlagerstätten des jetzigen Mitteldeutschlands entstehen ließ. Ursprünglich ein einheitliches Meer, jetzt eine bunte Mannigfaltigkeit verschiedener Salzgesteine. Es besteht gar kein Zweifel, daß diese Verschiedenheit nur durch Kristallisation, Wiederauflösung, Bildung gesonderter Laugenbecken und nachträglicher Umbildung der Salzgesteine entstanden ist. Auch setzen uns die physikalisch-chemischen Untersuchungen von van't Hoff und seinen Nachfolgern, zusammen mit der Anwendung der im Laboratorium gewonnenen Ergebnisse auf das Naturvorkommen, in die Lage, die Einzelheiten des Salzbildungsvorgangs mit großer Wahrscheinlichkeit zu erklären. Daß dieselben Kristallisationsgesetze für die Bildung der Silikatgesteine wie der Salzgesteine gültig sind, wird jetzt nicht mehr bezweifelt. Für die Auffassung, daß die Verschiedenheit der magmatischen Gesteine nur durch Kristallisation, erneute Einschmelzung und Vermischung verschiedener Teilmagmen entstanden ist, findet sich daher in der Salzgesteinsbildung ein beweiskräftiger Vergleichsgegenstand. (Aehnliche Betrachtungen bei A. Harker, The natural History of igneous Rocks, London 1909 und bei F. Rinne, Salzpetrographie und Metallographie im Dienste der Eruptivgesteinskunde. Fortschritte der Mineralogie usw. Bd. I, 1911, S. 181 bis 220.) Von den Salzgesteinen wissen wir, daß sie sich aus einer Lösung ausgeschieden haben, die in ihrer chemischen Zusammensetzung mit dem festen Produkt nicht übereinstimmt. In bezug auf die Magmen ist erst in neuester Zeit die Frage ernstlich erwogen worden, ob man bei den Eruptivgesteinen im allgemeinen auf ein erzeugendes Magma von derselben chemischen Beschaffenheit wie die des Erstarrungsprodukts schließen muß oder nicht (vgl. A. Harker l. c. Kapitel 13). Im wesentlichen scheint ein unter normalen Verhältnissen erstarrtes Gestein ein fast genaues Bild seines Muttermagmas zu geben, obgleich wir nicht vergessen dürfen, daß diese Erkenntnis auf deduktivem Wege gewonnen wurde und daher nur eine gewisse Wahrscheinlichkeit beanspruchen darf. Jedenfalls liegt hier eine Frage von einschneidender Bedeutung vor.

Die uns zugänglichen Gesteine gehören hauptsächlich zwei Typen an, einem sauren, granitischen und einem basischen, gabbro-basaltischen (Loewinson-Lessing, The fundamental Problems of Petrogenesis or the Origin of the igneous Rocks. Geol. Magazine 1911, 8, 248 bis 257 und 289 bis 297). Es ist nicht unwahrscheinlich, daß hier die bei der tiefsten Temperatur erstarrenden, eutektischen Schmelzreste eines großen ursprünglichen Magmas vorliegen. In diesem Fall würde auch die chemische Uebereinstimmung des Gesteins mit der Mutterschmelze eine notwendige Folge sein. Derartige Grundfragen zu lösen ist das keineswegs unerreichbare Ziel der synthetischen Methode in der Gesteinskunde. Noch selten hat eine Wissenschaft ihre Aufgabe für Jahrzehnte der Zukunft so klar in Hinblick auf Inhalt und Ausführung vor Augen gehabt.

Es läßt sich leicht in großen Zügen angeben, welche diese Aufgabe ist.

Sämtliche Eruptivgesteine sind mit unwesentlichen Ausnahmen aus neun Komponenten in verschiedenen Verhältnissen aufgebaut. Diese Komponenten sind: Kieselsäureanhydrid SiO_2, die Oxyde der dreiwertigen Metalle Aluminium und Eisen (Al_2O_3, Fe_2O_3), die Oxyde der zweiwertigen Metalle Magnesium, Calcium und Eisen (MgO, CaO, FeO), die Alkalioxyde Na_2O und K_2O und schließlich Wasser H_2O. Untergeordnet folgen dann zunächst Phosphorsäureanhydrid P_2O_5, Titandioxyd TiO_2 und Kohlensäure CO_2. Man wird nun feststellen müssen, welche Gleichgewichte sich aus gemischten Schmelzen von zwei oder mehr dieser Komponenten bei der Verfestigung herausbilden, also die Mineralassoziationen und ihre Altersfolge. Dabei wird man immer bestrebt sein, mit einfachen Verhältnissen anzufangen und allmählich zu verwickelten Systemen überzugehen. Es braucht wohl kaum hervorgehoben zu werden, daß die möglichen Kombinationen der genannten Komponenten sehr verschieden wichtig für das Problem der natürlichen Gesteinsbildung sind. Aber schon die Schwierigkeit der Untersuchungen verbürgt dafür, daß man hier systematisch vom Einfacheren zum Komplizierten schreiten und das zunächst Entbehrliche vermeiden wird.

Von dem hier skizzierten Programm der synthetisch-experimentellen Petrographie sind bis jetzt nur die allerersten Anfänge exakt durchgeführt. Auf das schon Erreichte wird weiter unten eingegangen werden.

3. Der Abkühlungsvorgang eines einheitlichen Magmas. Betrachten wir jetzt die Vorgänge, die sich in einem ursprünglich einheitlichen Magma bei sinkender Temperatur abspielen.

Es müssen hier zwei Fälle unterschieden werden, ob sich nämlich die Abkühlung im allseitig abgeschlossenen Raum in der Tiefe und daher sehr langsam und unter Druck vollzieht oder nach Erguß des Magmas auf die Erdoberfläche, also verhältnismäßig schnell und bei einem Druck, welcher den Atmosphärendruck nicht erheblich übersteigt. Die Bedeutung des Druckeinflusses ist noch nicht genügend aufgeklärt, sie dürfte wohl hauptsächlich eine mittelbare sein, derart, daß die flüchtigen Stoffe im Tiefenmagma nicht entweichen können, dagegen beim Oberflächenmagma aus dem Schmelzfluß verschwinden und auf die Kristallisation also keine Wirkung ausüben können.

Wir wollen zunächst die Bildung der Tiefengesteine allgemein besprechen.

Kühlt sich der Schmelzfluß ab und nehmen wir an, daß er nicht genau eine eutektische Zusammensetzung hat, so wird bei einer gegebenen Temperatur, abhängig von der chemischen Zusammensetzung und untergeordnet auch vom Druck, Sättigung an einem bestimmten Mineral eintreten; dieses Mineral kristallisiert also aus, vorausgesetzt, daß bei der sehr langsamen Temperaturabnahme keine Uebersättigung stattfindet, (vgl. Abschnitt 4). Dadurch verschiebt sich die Zusammensetzung des Schmelzrestes und mit ihr die Gleichgewichtstemperatur der erst ausgeschiedenen Kristalle neben der Schmelze. Nachdem diese Verschiebung und die zugehörige Temperaturabnahme ein bestimmtes Maß erreicht hat, wird auch an einem zweiten Mineral Sättigung eintreten, die beiden „Bodenkörper" müssen sich dann weiterhin gleichzeitig (paragenetisch) ausscheiden usw. Hieraus ergibt sich eine Altersfolge der Minerale, die sich im fertigen Gestein mittels zweier wichtiger Merkmale beurteilen läßt. Die erstgebildeten Kristalle haben sich frei entwickeln können und weisen daher eine Begrenzung durch die ihnen eigentümlichen Kristallflächen auf, während die späteren Bildungen sich mit dem noch vorhandenen Raum begnügen müssen und bei fortschreitender Verfestigung immer mehr nur Lückenausfüllungen darstellen. Die älteren Ausscheidungen sind „idiomorph", die jüngeren „allotriomorph" ausgebildet.

Das zweite Merkmal besteht darin, daß frühere Bildungen von den späteren beim Wachstum umschlossen werden: Einschlüsse sind immer älter als der „Wirt". Ausnahmen bilden die regelmäßig eingelagerten Einschlüsse, die sich im festen Mineral durch Entmischung ausgeschieden haben, wie der Eisenglanz im Cancrinit, Feldspat, Carnallit (A. Johnsen).

Diese Gesichtspunkte sind in der mikro-

skopischen Petrographie ausgiebig beachtet worden und führten Rosenbusch zur folgenden allgemeinen Regel der Ausscheidungsfolge aus dem Magma:

1. Gewisse Nebengemengteile, wie Phosphate, Eisenerze, Spinell, Zirkon, Titanit usw. („Apatit und Erze").

2. Magnesium- und Eisen- oder Mg-Calcium und Fe-Calcium-Silikate, wie Olivin, Biotit, Amphibol, Pyroxen („farbige Silikate").

3. Kalk-, Alkalikalk- und Alkalisilikate, wie Feldspat und die Feldspatvertreter Nephelin, Leucit usw. („farblose Silikate"). Die Ausscheidungsfolge zeigt abnehmende Basizität.

4. Quarz.

Die Ausscheidungen werden also mit abnehmendem Alter immer kieselsäurereicher, der Schmelzrest enthält mehr Kieselsäure als der schon auskristallisierte Anteil.

Zwar hat man sehr häufig Ausnahmen dieser Regel gefunden, aber als allgemeiner Leitsatz hat sie sich wertvoll erwiesen. Nachdem man die Gesetze der Gleichgewichtslehre, der „Phasenlehre", auf die Mineralbildung angewandt hat, ist es deutlich geworden, daß eine allgemeine Uebereinstimmung der Ausscheidungsfolge in verschiedenen Gesteinen nicht bestehen kann, weil die letztere von der chemischen Zusammensetzung des Magmas abhängig ist. Diese bedingt die Temperatur und die Reihenfolge der Sättigung an bestimmten Mineralarten. Besonders auffällig ist die Tatsache, daß einige nur in kleiner Menge im Magma vorhandene Komponenten gerade unter den ersten Ausscheidungen (Apatit $Ca(Cl,F)_2.3Ca_3(PO_4)_2$, Zirkon $ZrSiO_4$, Perowskit $CaTiO_3$ usw.) vertreten sind. Die Löslichkeit dieser Verbindungen in der Silikatschmelze muß eine sehr geringe sein.

Bei fortschreitender Mineralausscheidung häufen sich die flüchtigen Komponenten im Schmelzrest immer mehr an und erzeugen einen zunehmenden Dampfdruck. Sie werden zum Teil in das Nebengestein eindringen, zugleich aber durch ihre in der Schmelze zunehmende Masse die Kristallisation wesentlich beeinflussen. Die petrographische Erfahrung hat gezeigt, daß es sich im magmatischen Dampf besonders um Chlor- und Fluorverbindungen von Schwermetallen, von Silicium und von Bor handelt; die Rolle des Wassers ist noch nicht sicher erkannt. Bei der Besprechung der Pneumatolyse (Abschnitt 8) werden diese Verhältnisse näher erläutert werden, wir beschränken uns jetzt zunächst auf den Kristallisationsvorgang im Schmelzreste selbst. Hier ändert sich in auffallender Weise die Struktur des sich bildenden Gesteins, was sich häufig durch eine sehr grobe Formentwickelung kundgibt (Pegmatit). Das vielfache Auftreten großer Drusen beweist die Mitwirkung flüchtiger Bestandteile bei der Ausbildung dieses Gesteins.

Schließlich resultiert aus dem ursprünglichen Magma eine heiße wässerige Lösung vieler Mineralstoffe, die sich unter ständiger Abkühlung und Ausscheidung der gelösten Bestandteile in Gängen und Spalten einen Weg sucht nach Stellen niedrigeren Drucks, also nach der Erdoberfläche zu. Unter günstigen Umständen verfestigt sich die Lösung noch weiter unter Eisbildung und erst im kryohydratischen Punkt (eutektischer Punkt wässeriger Lösungen) ist der Kristallisationsprozeß des Magmas beendet.

4. Abweichungen vom Gleichgewicht bei der Mineral- und Gesteinsbildung. Bei der Bildung der Tiefengesteine betrachteten wir den Fall, daß sich die Abkühlung langsam genug vollzieht, um die Gleichgewichtseinstellung bei der Mineralbildung zu ermöglichen. Jedoch nicht nur die Zeit, auch die Gegenwart der flüchtigen Stoffe übt eine wesentliche Wirkung zur Förderung der Kristallisation aus, wie oben schon kurz angedeutet wurde. Man hat diese Bestandteile daher als Mineralisatoren oder Kristallisatoren bezeichnet. Wie die Wirkung der Mineralisatoren, die jedenfalls beim Anfang der Magmenverfestigung nur in geringer Masse vorhanden sind, aufgefaßt werden muß, liegt noch im Dunkeln. Entweder ist die Wirkung eine „katalytische" (wobei man allerdings durch ein Wort eine auch in der sonstigen Chemie noch unverstandene Tatsache zu erklären sucht), oder es liegt nur eine Verminderung der Zähigkeit der Schmelze vor, was erfahrungsgemäß die Kristallisation erleichtert. Versuche über mit flüchtigen Stoffen beschickten Silikatschmelzen wurden bisher, wegen des erforderlichen erhöhten Drucks, nur wenig exakt ausgeführt. Wohl hat man seit langem beobachtet, daß kristallisationsunfähige Minerale sich aus Lösungen in Flußmitteln (Chlorid, Fluorid, Borat, Vanadinat, Wolframat usw.) gut kristallisiert abscheiden (Beispiele sind Quarz und Orthoklas).

Die beiden Faktoren der Kristallisation, reichliche Zeit und Gegenwart der Mineralisatoren, fehlen bei der Bildung der Oberflächengesteine. Daher verfestigen sich diese häufig als Glas. Die Gesetze der Unterkühlung, d. h. in unserem Fall der Ueberschreitung der Kristallisationstemperatur ohne Kristallbildung, wurden von G. Tammann (Kristallisieren und Schmelzen, Leipzig 1903) bei einer Reihe namentlich organischer Stoffe erforscht. Es sind hierbei zwei Momente zu unterscheiden, 1. die Zahl der Kristallkeime, die in der Zeiteinheit gebildet werden; 2. die

Wachstumsgeschwindigkeit der Keime oder Kerne. Die Kernzahl ist bei der Gleichgewichtstemperatur gleich Null, steigt mit wachsender Unterkühlung und nimmt dann wieder ab, um bei einem für jeden Stoff verschiedenen Maß der Unterkühlung praktisch auf Null zu sinken. Die Wachstumsgeschwindigkeit dagegen nimmt wie jede Reaktionsgeschwindigkeit stetig mit der Temperatur ab. Die Resultante dieser beiden Momente kann man als Kristallisationsfähigkeit bezeichnen. Stellt man die Kernzahl und die Wachstumsgeschwindigkeit in ihrer Abhängigkeit von der Unterkühlung graphisch dar, so hängt es nur von der relativen Gestalt der beiden Kurven ab, ob die Resultierende, die Kristallisationsfähigkeit, ein Maximum aufweist oder nicht. Ein solches Maximum bildet die Optimumtemperatur für die Aufhebung der Unterkühlung, für die Entglasung. Ein lehrreiches Beispiel einer solchen Optimumtemperatur liefert das Natriumsilikat Na_2SiO_3. Kühlt man die Schmelze rasch ab, so erhält man ein festes Glas. Erhitzt man dieses mit dem Bunsenbrenner auf dunkle Rotglut, so findet die Entglasung unter plötzlichem Aufleuchten (infolge der freiwerdenden Kristallisationswärme) statt.

Bei den Oberflächengesteinen ist nun die glasige Erstarrung eine sehr häufige Erscheinung. Sogar findet man in dem Glase recht häufig Kristallpartikel; das Vorhandensein von Keimen genügte hier also nicht, um durch ihre Impfwirkung das Glas zur Kristallisation zu veranlassen, die Kristallisationsgeschwindigkeit ist dazu zu gering. Wie schon erwähnt, ist die Zähigkeit der Schmelze von wesentlichem Einfluß auf die Kristallisationsfähigkeit. Basische Laven fließen schneller als saure infolge der geringeren inneren Reibung der ersteren und neigen auch weniger zur Unterkühlung. Entsprechend lassen sich Gleichgewichtsuntersuchungen im Laboratorium bei „trockenen" (d. h. frei von flüchtigen Stoffen) basischen Schmelzen meist gut ausführen, während sie bei kieselsäurereichen Schmelzen gewöhnlich scheitern oder wenigstens sehr viel schwieriger werden durch eine glasige Unterkühlung, die auch durch Impfen nicht überwunden werden kann.

Eine mit der Unterkühlung eng verknüpfte Abweichung vom Gleichgewicht ist die Ueberhitzung von Kristallen. Bis vor kurzem war man der Ansicht, daß die Erhaltung des kristallisierten Zustandes über die Schmelztemperatur hinaus um einen noch so kleinen Betrag ausgeschlossen sei; der Uebergang aus dem geordneten Molekularzustand des Kristalls in die ungeordnete Schmelze vollziehe sich immer rascher als eine Temperaturerhöhung durch Wärmezufuhr möglich ist. Seit 1905 hat man nun aber bei einigen Stoffen mit außerordentlich zäher Schmelze, wie Albit, Orthoklas, auch Kieseldioxyd, Ueberhitzungen bis 120° über den Schmelzpunkt erreicht (Day und Allen, The Isomorphism and thermal Properties of the Feldspats, Washington 1905). Während Albit nach einem Verweilen von mehreren Stunden bei 1125° schon teilweise schmilzt, sind nach einer Erhitzung auf 1247° noch kristalline Partikel übrig geblieben. Die große Zähigkeit der Schmelze wurde dadurch illustriert, daß ein Balken aus Albit auf einen Platintiegel gelegt und bis zur partiellen Schmelzung erhitzt, beim Drücken mittels eines Stabes eine Durchbiegung der übrig gebliebenen Kristallteile sowohl wie der Schmelze aufwies.

Eine ganz andere Abweichung vom Gleichgewicht bei der natürlichen Mineral- und Gesteinsbildung, die man bei den synthetischen Untersuchungen möglichst zu vermeiden sucht, liegt in der Inhomogenität des Schmelzflusses. Ein beschränktes Magmenbassin in der sonst festen Lithosphäre wird ohne Zweifel das Nebengestein in Lösung bringen, ebenso wie man eine Silikatschmelze nicht in einem Porzellantiegel herstellen oder dauernd halten kann, auch wenn der Schmelzpunkt des Porzellans noch lange nicht erreicht ist. Außerdem werden bei Bewegungen im Magma oder in der Erdkruste leicht Teile des Nebengesteins abgetrennt, in das Magma aufgenommen und ganz oder teilweise aufgelöst. Derartige Fremdkörper erzeugen Inhomogenitäten in der Schmelzmasse, die sich nach der Verfestigung des Gesteins durch abweichende Struktur und Mineralbestand, durch Schlieren, durch kugelförmige Bildungen usw. kundgeben. Beispiele solcher Einschmelzprozesse sind in der petrographischen Literatur in großer Anzahl angeführt; so muß der teilweise aufgelöste, „resorbierte" Quarz in gewissen Basalten (also basischen Gesteinen) sicher als Einschmelzungsprodukt angesprochen werden. Gesteine, welche durch derartige Vermischungsvorgänge ihr besonderes Gepräge erhalten haben, werden von Harker (l. c.) treffend als „Bastardgesteine" bezeichnet. Selbstverständlich können die Kristallisationsgesetze auf derartige Gebilde nicht angewandt werden, wenigstens nicht auf das Gestein als Ganzes. Man wird ein Bastardgestein in jedem besonderen Falle durch petrographische und geologische Untersuchung sowohl des Vorkommens selbst wie des Nebengesteins entziffern müssen.

5. Mineralschmelzpunkte und Umwandlungen. Die Schmelzpunkte der Minerale, wenn auch nicht in erster Linie für die Ausscheidungsfolge im Gestein maßgebend, besitzen doch für die Beurteilung

der genetischen Vorgänge besondere Bedeutung, und ihre exakte Bestimmung ist daher eine wichtige Aufgabe. Erst in den letzten Jahren ist es mit Hilfe elektrischer Oefen und genau durchprobierter Messungsmethoden für hohe Temperaturen möglich geworden, auch in dem Gebiet des Weißglühenden Bestimmungen auszuführen, deren relative Genauigkeit mit den Messungen bei gewöhnlicher und wenig erhöhter Temperatur übereinstimmt. Es ist ein besonderes Verdienst der Forscher im Geophysikalischen Institut zu Washington, die Temperaturmessung bis 1600° mit dem Thermoelement und von dort bis ca. 2200° mit dem optischen Pyrometer so weit vervollkommnet zu haben, daß die ersteren eine absolute Genauigkeit von ca. 2°, die letzteren von ca. 10° besitzen. Einige in dieser Weise genau bestimmte Mineralschmelzpunkte sind hier zusammengestellt (vgl. Day and Sosman, The Melting Points of Minerals in the Light of recent Investigations on the Gas Thermometer, Amer. Journ. of Science 1911, **31**, 341 bis 349. Die fast sämtlich in dieser Zeitschrift veröffentlichten Arbeiten des Geophysikalischen Instituts erscheinen auch als Uebersetzungen in der Zeitschrift für anorganische Chemie);

Sillimanit Al_2SiO_5	1816°
Platin Pt	1755
Anorthit $CaAl_2Si_2O_8$	1552
Diopsid $CaMg(SiO_3)_2$	1391
Gold Au	1062
Steinsalz NaCl	800

Diese Schmelzpunkte gelten für Atmosphärendruck, bei Schmelz- und Erstarrungsvorgängen in der Erdkruste muß jedoch mit bedeutend erhöhten Drucken gerechnet werden. Zwar sind noch keine experimentellen Daten über die Schmelzpunktsänderung hochschmelziger Stoffe mit dem Druck vorhanden, eine einfache physikalisch-chemische Formel ermöglicht es aber, den gesuchten Wert mit anderen Größen in Beziehung zu setzen und daraus zu berechnen. Die Schmelzpunktsänderung dt bei einer Druckänderung dp berechnet sich aus der Schmelzwärme W, der absoluten Temperatur T (gleich Temperatur Celsius + 273°) und der Volumänderung beim Schmelzen $V_{flüssig} - V_{fest}$ nach der Formel[1]):

$$\frac{dt}{dp} = \frac{T(V_{flüssig} - V_{fest})}{W}$$

Die Schmelzwärme der Silikate beträgt rund 100 cal pro Gramm (Schmelzwärme des Wassers 79 cal pro Gramm). Den Volumunterschied beim Schmelzen kann man einstweilen schätzen aus dem entsprechenden Unterschied bei glasig und kristallin erstarrten Körpern; die Zahl wechselt von Fall zu Fall, ist aber mit wenigen Ausnahmen (Wasser, Wismut) positiv. Der Druck bewirkt daher, abgesehen von den genannten Ausnahmen, eine Schmelzpunkts*erhöhung*. Die Größe läßt sich z. B. beim Diopsid annähernd zu 1,9° pro 100 Atm. berechnen (Schmelzwärme nach J. H. L. *Vogt* 102 cal, Volumunterschied Glas-Kristalle bei gewöhnlicher Temperatur 0,047 nach *Allen* und *White*). Uebertragen wir dieses Ergebnis auf die Eruptivgesteine und nehmen wir das spezifische Gewicht der Gesteine zu 2,7 an, so geht daraus eine Schmelzpunktserhöhung von 5,1° pro 1000 m Tiefe hervor.

Allerdings ist hier der Druck einfach als ein hydrostatischer in Rechnung gebracht; man darf nicht vergessen, daß dieses Verfahren bei starren Körpern nicht ganz zutrifft; gebirgsbildende Vorgänge erzeugen viel größere Drucke auch in geringer Erdtiefe und andererseits kann das Gestein sich wie eine Brücke verhalten, die durch einen schrägen seitlichen Druck den vertikalen Druck ersetzt. Hohlräume tief unter der Erdoberfläche sind eine gewöhnliche Erscheinung und könnten bei hydrostatischer Druckverteilung nicht vorkommen. Ueber diese Momente wird bei petrographischen Betrachtungen häufig hinweggesehen.

Bei weiterer Abkühlung der aus dem Schmelzfluß ausgeschiedenen Substanz wird in vielen Fällen die kristallographische Form und damit der Komplex sämtlicher physikalischer Eigenschaften von einer bestimmten Temperatur ab instabil. Der Körper erfährt eine *Umwandlung* und zwar wird bei richtiger Gleichgewichtseinstellung eine Temperaturerhöhung über den Umwandlungspunkt den umgekehrten Vorgang hervorrufen. Die Umwandlung ist dann „umkehrbar“, der Stoff selbst wird *enantiotrop* genannt. Mit Umwandlungen, die nur in einem Sinne verlaufen (monotrope Stoffe), weil der Körper sich bis zu einem gewissen Temperaturbereich in instabiler Gestalt hat behaupten können und dann in die stabile Form umschlägt, wollen wir uns hier nicht beschäftigen; diese Vorgänge sind wegen des mangelnden Gleichgewichtes für Schlüsse auf natürliche Bildungsprozesse weniger verwendungsfähig als die umkehrbaren Umwandlungen. Solange man bei mineralogischen Untersuchungen hohe Temperaturen und physikalisch-chemische Messungsmethoden nur selten anwandte, galten umkehrbare Umwandlungen für besondere Ausnahmen im Mineralreich. Mehrere Modifikationen bei derselben chemischen Zusammensetzung waren fast nur dort bekannt, wo instabile Formen neben anderen instabilen oder stabilen bei gewöhnlicher Temperatur bestehen können (Kalkspat und Aragonit; Aluminiumsilikat Al_2SiO_5 als Andalusit, Disthen und Sillimanit usw.

[1]) Bei zahlenmäßiger Anwendung der Formel müssen die Einheiten übereinstimmend nach dem cgs-System gewählt werden.

Die experimentell-synthetische Methode hat aber alsbald gezeigt, daß reversible Umwandlungen bei hoher Temperatur eine recht häufige Erscheinung bei den Mineralen sind, wenn auch gerade einige der häufigsten gesteinsbildenden Minerale, wie Muscovit, Biotit, Olivin nur in einer Modifikation vorzukommen scheinen.

Wenn man den Umwandlungen bei der Beurteilung der Gesteinsgenese Rechnung trägt, so ermöglicht ihre Erkenntnis Anwendungen, die weit über den Wert der einzelnen Tatsache hinausgreifen. Wir haben gesehen, daß die Ausscheidungstemperatur eines einzelnen Minerals aus einer gemischten Schmelze mit seiner eigenen Schmelztemperatur nur im losen Zusammenhang steht und durch die chemische Zusammensetzung der Schmelze bedingt wird. Anders verhalten sich die Umwandlungstemperaturen. Hat sich ein Mineral rein, nicht als Mischkristall, ausgeschieden, so ist die Umwandlungstemperatur von den Nebengemengteilen im Gestein oder der noch vorhandenen Schmelze völlig unabhängig. In den Umwandlungen haben wir also Vorgänge gefunden, die als Fixpunkte des sogenannten geologischen Thermometers gelten können, sie geben uns Aufschluß über die Temperatur, die bei der Mineral- und Gesteinsbildung aus dem Schmelzfluß geherrscht hat. Erwähnen wir als treffendes Beispiel das Kieseldioxyd. Unterhalb 575° kristallisiert die Kieselsäure als Quarz aus, oberhalb dieser Temperatur in einer anderen Form des hexagonalen Systems. Die letztere als β-Quarz bezeichnete Modifikation wandelt sich bei der genannten Temperatur ohne merkliche Verzögerung umkehrbar in den gewöhnlichen α-Quarz um. Hat sich der Quarz in einem Gestein oberhalb 575° ausgeschieden, so muß er die Umwandlung durchgemacht haben. Es gelang nun Spuren einer solchen Umwandlung auch im abgekühlten Mineral nachzuweisen. Die bei der Umwandlung aufgetretene Volumänderung hat Spannungen und Sprünge erzeugt, welche sich beim Aetzen mit Flußsäure deutlicher zeigen; auch gibt die Art der Zwillingsbildung Anzeichen dafür, ob ein Quarzkristall ursprünglich in β- oder α-Form gebildet ist. Diese zum großen Teil von Mügge angegebenen Merkmale wurden nun von Wright und Larsen (Quarz as a Geologic Thermometer, Amer. Journ. of Science 1909, **27**, 421 bis 447) auf 44 verschiedene Quarzvorkommnisse angewandt. Es zeigte sich, daß die Quarze in Graniten und Quarzporphyren oberhalb 575° gebildet sind, diejenigen aus Drusen und größeren Quarzmassen unterhalb dieser Temperatur. Das Hauptinteresse liegt beim Uebergangsglied, den pegmatitischen Bildungen. Hier fanden die genannten Forscher, daß der Quarz aus Schriftgranit (eine Verwachsung von Feldspat und Quarz, die in Pegmatiten häufig ist) und Granitpegmatit als β-Quarz, dagegen derjenige aus den zuletzt verfestigten Pegmatitadern unterhalb 575° entstanden ist. Mit diesen Quarzen sind wieder andere Minerale in nachweisbaren Altersbeziehungen verwachsen. Man kommt somit zum allgemeinen Schluß, daß für die Temperatur der Pegmatitbildung rund 575° angenommen werden muß.

Eine ähnliche Verwendung als geologisches Thermometer können auch andere Umwandlungsvorgänge finden, obgleich die bei den Mineralen sehr häufige Bildung von Mischkristallen (sogenannte feste Lösungen) hier eine wesentliche Beschränkung bedingt. Auch darf die Aenderung der Umwandlungstemperatur mit dem Druck nicht vernachlässigt werden. Hier gilt eine ähnliche Formel wie die oben für den Schmelzpunkt angegebene.

Schließlich sei die Bestimmungsmethode der Schmelz- und Umwandlungspunkte kurz erwähnt. Im Prinzip könnte man jede physikalische Eigenschaft in ihrer Abhängigkeit von der Temperatur benutzen, weil beim Schmelzen oder Umwandeln eine Unstetigkeit im ganzen physikalischen Verhalten auftritt. In der Praxis hat sich aber für hohe Temperaturen (außer der unmittelbaren optischen Beobachtung) fast nur die thermische Methode, d. h. die Wahrnehmung der Aenderung des Energieinhalts als verwendbar erwiesen. Beim Schmelzen wird Wärme gebunden und trotz der Wärmezufuhr vom Ofen bleibt daher die Temperatur während des Schmelzprozesses konstant. Liest man die Temperatur der Versuchssubstanz in regelmäßigen Zeitintervallen ab, so findet sich beim Schmelzen eine Halte in der Kurve, welche die Zeit-Temperaturbeziehung wiedergibt. In entsprechender Weise kann man auch Umwandlungen nachweisen oder Abkühlungs- statt Erhitzungskurven verwenden.

6. Einiges über Zweistoffsysteme. Durch die Arbeiten von Bakhuis Roozeboom sind die Verhältnisse bei der Kristallisation und den eventuellen Umwandlungen in Zweistoffsystemen theoretisch und in Beispielen bekannt geworden. Auch minerogenetische Untersuchungen mit binären Systemen bei hoher Temperatur wurden schon vielfach ausgeführt; trotzdem ist die Zahl der genau durchgearbeiteten Fälle eine noch recht geringe. Sie stammen fast alle aus dem unter A. L. Days Leitung stehenden Geophysikalischen Institut in Washington.

Die Bedeutung des Eutektikums. Für die theoretische Erörterung der Schmelzdiagramme muß auf die Artikel „Chemisches

Gleichgewicht" und „Phasenlehre" verwiesen werden. So soll auch hier das Zustandekommen des Eutektikums als Schnittpunkt zweier Ausscheidungs- oder Löslichkeitslinien im Diagramm als bekannt vorausgesetzt werden (vgl. Fig. 1 Punkt E). Die Zusammensetzung sowohl wie die Kristallisationstemperatur des Eutektikums hat für die Mineral- und Gesteinsbildung eine besondere Bedeutung. Zwar werden reine Zweistoffsysteme in der Natur sehr selten vorkommen, aber auch über verwickelte Verhältnisse läßt sich aus den einfachen schon mancher Schluß ziehen. Ist eine Komponente des Magmas in bezug auf die eutektische Zusammensetzung im Ueberschuß vorhanden, so muß sich das dieser Komponente entsprechende Mineral zuerst ausscheiden. Hieraus ist mit einem Schlage ersichtlich, daß die Rosenbusch'sche Ausscheidungsregel bei Magmen von wechselnder Zusammensetzung, wie sie in der Natur vorliegen, keine allgemeine Gültigkeit besitzen kann.

Es ist nicht unwahrscheinlich, daß die Lage der Eutektika in der Zukunft das Prinzip einer natürlichen Gesteinssystematik bilden wird. Dabei ist es von besonderer Wichtigkeit, auch den Einfluß des Drucks in Betracht zu ziehen. Eine erste Betrachtung über diesen Gegenstand verdanken wir J. H. L. Vogt (Die Silikatschmelzlösungen II, 1904, 170 bis 180). In der Grundmasse der Quarzporphyre findet sich häufig eine innige Verwachsung von Quarz und Orthoklas, die auf eine gleichzeitige eutektische Ausscheidung dieser beiden Minerale hinweist. Aehnliche Verwachsungen derselben Minerale kommen makroskopisch als Schriftgranit in Tiefengesteinen vor. Ueber solche schriftgranitische Verwachsungen, sowohl makro- wie mikroskopisch, sind zahlreiche analytische Angaben bekannt. Vogt hat diese kritisch gesammelt und kommt zum Schluß, daß die Zusammensetzung (25% Quarz, 75% Feldspat) für Tiefen- und Oberflächengesteine annähernd dieselbe, daß also ein Druckeinfluß nicht merklich vorhanden ist. Experimentelle Untersuchungen werden hier weitere und auch genauere Daten schaffen müssen.

Als Beispiele für Zweistoffsysteme wollen wir zwei wichtige Spezialfälle, in welchen schon verschiedene Möglichkeiten vertreten sind, etwas eingehender betrachten.

Das System Aluminiumoxyd-Kieselsäure (Fig. 1). Die Verhältnisse liegen hier ziemlich einfach, weil die beiden Oxyde nur eine einzige Verbindung miteinander bilden und Mischkristalle nur ganz untergeordnet auftreten. Experimentell war die Untersuchung dagegen insoweit schwierig, als die Schmelztemperaturen im ganzen System über ca. 1600° liegen. Es konnten dadurch nur invariante Punkte (Schmelzpunkte reiner Verbindungen, Eutektika), keine Ausscheidungslinien festgelegt werden.

In der Natur kommt das Aluminiumsilikat Al_2SiO_5 in drei verschiedenen Modifikationen, als Andalusit, Disthen und Sillimanit vor. Bei den synthetischen Untersuchungen konnten jedoch die beiden ersteren

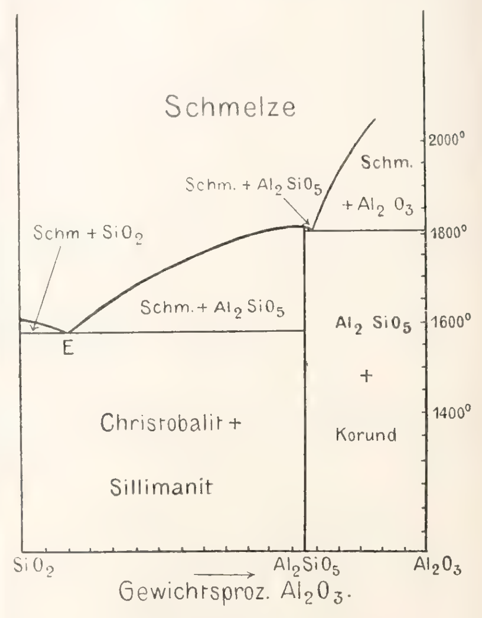


Fig. 1. Gleichgewichtsdiagramm des Systems SiO_2—Al_2O_3.

trotz erheblicher Bemühung nicht hergestellt werden. Entweder liegen hier Fälle von Monotropie vor oder es sind die in der Natur so häufigen Minerale Andalusit und Disthen zwar in einem bestimmten Temperaturgebiet stabil, aber erst in Gegenwart weiterer Komponenten entstehungsfähig. Einen Fingerzeig gibt die Beobachtung von Vernadsky, daß die beiden genannten Minerale durch Erhitzen auf rund 1300° das spezifische Gewicht und die optischen Eigenschaften des Sillimanits annehmen, sich also in diese auch aus der Schmelze sich ausscheidende Modifikation umwandeln.

Betrachten wir jetzt ein anderes binäres System, Calciumoxyd-Kieselsäure, wo die Verhältnisse verwickelter liegen als im vorhergehenden. In vielen verschiedenen Gebieten der petrographischen und technischen Wissenschaft spielen Mischungen aus Kalk und Kieselsäure bei hoher Temperatur, mit oder ohne Nebenbestandteile, eine bedeutende Rolle. Bei der synthetischen Untersuchung des Systems konnten also einerseits eine Anzahl von sehr verschiedenen Seiten gewonnener Erfahrungen verwendet werden,

andererseits setzt uns eine genaue Kenntnis der Verhältnisse im reinen Zweistoffsystem in die Lage, das schon Bekannte vielfach in einem neuen Zusammenhang zu erblicken. Gesteine aus Kalk (als Calciumcarbonat) und Quarz bestehend, sind im Kontakt mit glutflüssigen Magmen- oder Lavenmassen vielerorts einer sehr hohen Temperatur ausgesetzt gewesen; der Hüttenmann setzt seiner silikatischen Schlacke Kalk zu, um diese dünnflüssig und gut kristallisierbar zu machen, endlich verwendet der Techniker Mischungen aus Kalk und Sand zur Herstellung von Kunststeinen, solche aus Kalk und Ton (Aluminiumsilikat) zur Bildung von Portlandzement.

In der Natur ist das Calciummetasilikat, der monokline Wollastonit $CaSiO_3$ häufig.

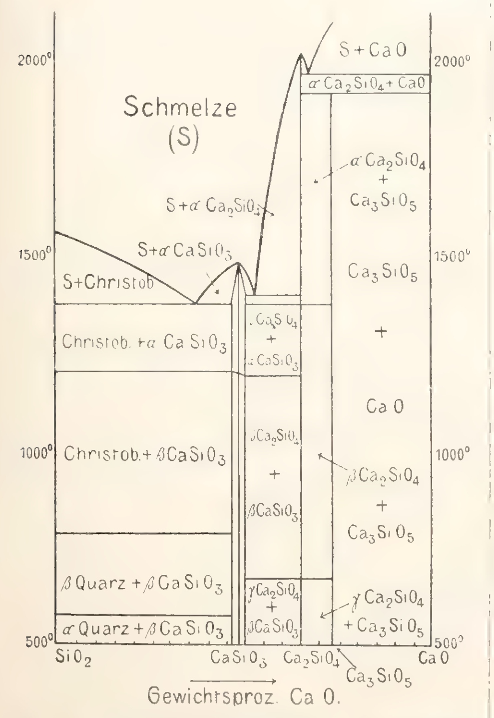


Fig. 2. Gleichgewichtsdiagramm des Systems SiO_2—CaO.

In künstlichen Schlacken dagegen hat man eine Verbindung von derselben chemischen Zusammensetzung, jedoch in annähernd hexagonaler, sogenannter pseudohexagonaler Form entdeckt und als Pseudowollastonit bezeichnet; ebenfalls wurde ein Körper vom Typus $4CaO.3SiO_2$, Åkermanit (J. H. L. Vogt) nur in Schlacken angetroffen. Schließlich ist im Portlandzement ein Bestandteil der Zusammensetzung Ca_2SiO_4, das Calciumorthosilikat und ebenfalls ein Trikalziumsilikat $3CaO.SiO_2$ häufig. Das Studium der Schmelzerscheinungen (Day, Allen, Shepherd, White und Wright. Die Kalkkieselreihe der Minerale. Tscherm. Min. u. Petr. Mitt. 1907, 26, 169 bis 232. Shepherd and Rankin. Preliminary Report on the Ternary System CaO—Al_2O_3—SiO_2. A Study of the Constitution of Portland Cement Clinker. Journ. of Industrial and Engineering Chemistry 1911, 3, Nr. 4.) hat nun die Bildung aller dieser Verbindungen, mit Ausnahme des Åkermanits, klargelegt. In Figur 2 sind die Ergebnisse als Diagramm eingetragen. Es zeigt sich hier deutlich eine höchst wichtige Eigenschaft der synthetischen Gesteinskunde auf physikalisch-chemischer Grundlage: das Resultat einer sehr schwierigen Untersuchung, die oft jahrelange Arbeit beansprucht, kann in eine einzige Figur niedergelegt werden, aus welcher der Sachkundige alles Wesentliche abzulesen imstande ist.

Aus gemischten Schmelzen von Calciumoxyd und Kieselsäure kristallisieren außer den beiden Komponenten Calciumoxyd und Kieselsäure (als Christobalit, der bei ca. 800° reversibel in β-Quarz übergeht) nur zwei Verbindungen aus, und zwar der Pseudowollastonit und das Orthosilikat Ca_2SiO_4. Wird der Pseudowollastonit weiter abgekühlt, so wandelt er sich bei 1190° umkehrbar in die gewöhnliche Wollastonitform um. Oberhalb dieser Temperatur muß sich also das Metasilikat auch aus einer beliebig zusammengesetzten Schmelze in der pseudohexagonalen, unterhalb derselben in der monoklinen Form abscheiden, vorausgesetzt, daß reines $CaSiO_3$, nicht ein Mischkristall mit einer weiteren Komponente der Schmelze, zur Bildung gelangt. Hier würde man wiederum einen wichtigen Punkt des geologischen Thermometers gefunden zu haben glauben, wie wir es im Abschnitt 5 für den Quarz auseinandersetzten. Es hat sich jedoch herausgestellt, daß ein Gehalt an Magnesiumoxyd in der Schmelze — wie es bei natürlichen magmatischen Mineralbildungen wohl durchwegs der Fall ist — die Umwandlungstemperatur Wollastonit ⇄ Pseudowollastonit infolge der Bildung eines magnesiumhaltigen Calciumsilikates auf rund 1300° erhöht. Dieser Tatsache, die sich durch Hinzuziehung von Eisenoxydul zur Schmelze noch weiter modifizieren dürfte, muß also bei Anwendungen Rechnung getragen werden.

Das bei sehr hoher Temperatur (2086°) schmelzbare Calciumorthosilikat weist zwei umkehrbare Umwandlungen auf. In der Natur scheint es sich nicht gebildet zu haben, wohl deshalb, weil so kalkreiche Magmen nicht vorkommen. Sollte es aber als Mineral doch manchmal entstanden sein, so müßte es sich wegen der Zersetzlichkeit durch Wasser und auch durch den Zerfall beim Ueberschreiten der Umwandlungstemperatur bei 675°,

was mit einer Volumänderung von 10% verknüpft ist, der Beobachtung im fertigen Gestein entzogen haben.

Schließlich veranlaßt uns das Vorkommen des Trikalziumsilikats $3CaO.SiO_2$ eine weitere wichtige Mineralbildung zu erwähnen. Diese Verbindung ist in Berührung mit einer Schmelze von derselben Zusammensetzung instabil, bildet sich jedoch in festem Zustande aus Kalziumorthosilikat und -oxyd bei ca. 1900°. Wird durch eine dritte Komponente — z. B. Aluminiumoxyd, wie es in der Portlandzementfabrikation geschieht — die Erstarrungstemperatur erniedrigt, so kann sich das Tricalciumsilikat auch unmittelbar aus der Schmelze ausscheiden (Shepherd und Rankin l. c.).

7. Ternäre und Mehrkomponentensysteme. In den binären Systemen lassen sich die Kristallisations- und Umwandlungstemperaturen gemischter Schmelzen in ihrer Abhängigkeit von der Zusammensetzung durch zwei Koordinaten, also in der Ebene darstellen. Besteht die Zusammensetzung jedoch aus drei Größen, deren Verhältnis (somit zwei Zahlen) eingetragen werden muß, so beansprucht die Darstellung des Mengenverhältnisses schon eine Ebene. Die zugehörige Temperaturachse muß also im Raume angebracht werden. Wenn auch ein solches Raummodell, gewöhnlich als dreiseitiges Prisma, für jeden besonderen Fall hergestellt werden kann, so muß man sich für die Wiedergabe der Resultate meist mit Projektionen oder Durchschnitten begnügen. (Vgl. H. E. Boeke, Räumliche ternäre Kristallisationsmodelle für den Unterricht in physikalisch-chemischer Mineralogie, Centralblatt f. Miner. usw. 1912.)

Vermehrt sich die Anzahl der Komponenten noch um eine weitere, so ist für die Darstellung des Mengenverhältnisses allein schon eine Raumfigur notwendig. Versuche, die mehrdimensionale Geometrie auf Gleichgewichtsprobleme anzuwenden, sind noch nicht gemacht worden und haben sich bis jetzt noch als umgänglich erwiesen. Auch die verwickelten Fälle, die bei der physikalisch-chemischen Salzlagerstättenforschung vorlagen, konnten durch zweckentsprechende Einschränkungen des Problems in ebenen Figuren quantitativ dargestellt werden, und ähnliches dürfte auch bis in eine nicht allzu nahe Zukunft bezüglich der Mineralbildung aus dem Magma der Fall sein.

Die theoretischen Verhältnisse bei Dreistoffsystemen sind namentlich durch Schreinemakers' Arbeiten (Bd. 3 von Bakhuis Roozeboom, Die heterogenen Gleichgewichte vom Standpunkte der Phasenlehre, Braunschweig 1911) bekannt und an Beispielen geprüft worden. Als experimentelle Anwendung auf minerogenetische Fragen kann schon auf eine eingehende Arbeit von Shepherd und Rankin (l. c.) über das System $CaO—Al_2O_3—SiO_2$ hingewiesen werden, die aber erst als vorläufiger Bericht veröffentlicht wurde.

Es würde uns zu weit führen, auf die Verhältnisse bei Dreistoffsystemen, die binäre und ternäre eutektische Ausscheidung, die Resorption erst ausgeschiedener Verbindungen bei der weiteren Abkühlung, die Kristallisationsbahnen, die Bildung ternärer Mischkristalle usw. hier einzugehen. Der Zweck unserer nur fragmentarischen Besprechung der physikalisch-chemischen Beziehungen bei der Erforschung der Mineral- und Gesteinsbildung wird völlig erreicht sein, wenn auch der Fernerstehende den Eindruck gewonnen hat, daß für diese Wissenschaft eine neue Entwickelungsperiode angebrochen ist, und wenn er Klarheit erlangt hat, an welchen Bahnen entlang sich diese Entwickelung bewegt.

8. Die flüchtigen Bestandteile des Magmas. Pneumatolyse. In Abschnitt 3 wurde schon die Wirkung der flüchtigen Magmenbestandteile kurz besprochen. Welche diese sind, kann sowohl unmittelbar aus vulkanischen Dampfausströmungen, wie auch aus den Vorkommnissen, welche die Eruptivgesteinsmassive in Gängen und Spalten begleiten, beurteilt werden. In den vulkanischen Dämpfen hat man eine große Reihe von Chloriden und auch Fluoriden der Schwer- und Leichtmetalle, weiterhin Sulfate, Sulfide, Arsenide usw., schließlich auch Gase wie Kohlendi- und monoxyd, Kohlenwasserstoffe, Wasserstoff, Stickstoff nachgewiesen. Durch die genauen umfangreichen Analysen vulkanischer Dämpfe, welche in neuerer Zeit von A. Brun (Recherches sur l'exhalaison volcanique, Genève et Paris 1911) angestellt wurden, hat sich nun eine höchst merkwürdige und unerwartete Tatsache herausgestellt: die Dämpfe der Vulkane in wasserarmen Gegenden sind wasserfrei, das Wasser in vulkanischen Dämpfen rührt nur von der Erdoberfläche her. Andererseits kann nicht daran gezweifelt werden, daß im Magma Wasser aufgelöst ist, die wasserhaltigen Minerale (besonders Glimmer und Hornblende), ferner die wässerigen Einschlüsse in Eruptivgesteinsmineralen und der Wassergehalt vieler Gesteinsgläser legen davon Zeugnis ab. Der Grund des Fehlens von Wasser in den Ausströmungen beruht höchstwahrscheinlich darauf, daß es bei der hohen Temperatur in der Silikatschmelze fast vollständig elektrolytisch dissoziiert (in die Ionen $\overset{+}{H}$ und $\overset{-}{OH}$ gespalten) und daher ohne Dampfdruck ist. Erst bei verhältnismäßig reichlichen

Wassermengen im Magma wie am Schluß der Erstarrung wird das Wasser auch dampfförmig austreten. Ebenso führt eine verdünnte wässerige Salzsäurelösung keine merkliche Salzsäuremenge im Dampf.

Die Rolle des Wassers (wie auch diejenige der flüchtigen Bestandteile bei genügend hohem Druck) äußert sich also wesentlich nur in einer Verminderung der Viskosität und entsprechender Erhöhung der Kristallisationsfähigkeit der Schmelze (oder in einer Katalyse) und weiterhin in chemischen Umsetzungen schon verfestigter Minerale. Die durch diese Prozesse hervorgerufenen Erscheinungen, für die wir schon in der Pegmatitbildung ein Beispiel erwähnten, werden als endogene Pneumatolyse bezeichnet. (Unter den Begriff „Pneumatolyse" vereinigte Bunsen die Gesamtheit der Bildung und Umbildung von Mineralen durch magmatische Dämpfe.) Gewöhnlich sind derartige Wirkungen am Rande von Tiefengesteinsmassiven am meisten ausgeprägt; granitische, also saure Gesteine sind mehr mit den Beweisen pneumatolytischer Wirkung ausgestattet als basische. Ein vorzügliches Beispiel endogener Pneumatolyse ist das Zinnerzvorkommen im Erzgebirge. Ein mächtiger Granitstock führt an seiner Peripherie viele zinnstein-(SnO_2-)haltige Gänge, als Begleitminerale treten fluor- und borhaltige Verbindungen (Flußspat, Topas, Turmalin), auch Wolframit $(Fe,Mn)WO_4$ usw. auf, der Granit selbst geht zum Teil in eine sehr grobkörnige Varietät, den sogenannten Stockscheider, über, zum Teil ist er durch Einwirkung der Gase in Greisen verändert. Das letztere Gestein besteht nur aus Quarz und einem lithionhaltigen Glimmer; der Feldspat des Granits ist zerstört worden.

Viele für pneumatolytische Prozesse charakteristische Minerale, wie Zinnstein und Quarz, sind für sich nicht flüchtig. Sie müssen also aus einer flüchtigen Phase durch chemische Reaktion ausgefallen sein. Die Erfahrung, daß Fluor und Chlor unter den dampfförmigen Erzeugnissen des Magmas eine Hauptrolle spielen, legt es nahe, diese Reaktion wie folgt anzunehmen:

$$SiF_4 + 2H_2O = SiO_2 + 4HF$$

Aus einer solchen Reaktion können wir mit Hilfe physikalisch-chemischer Betrachtungen wichtige Folgerungen für das Naturvorkommen ziehen.[1]) Es findet nämlich nicht nur die Reaktion von links nach rechts, sondern ebenfalls diejenige von rechts nach links statt; die Tatsache, daß Quarz von Flußsäure angegriffen wird unter Bildung des flüchtigen Fluorsiliciums ist bekannt. Welche der beiden Reaktionen das Uebergewicht besitzen wird, hängt von der Temperatur und dem Druck ab. Bei Temperaturzunahme wird diejenige Reaktion stattfinden, die Wärme bindet, nach dem allgemeinen Naturgesetz, daß ein Gleichgewichtsvorgang, der durch irgendeine Ursache hervorgerufen wird, immer so verläuft, daß diese Ursache wieder vernichtet, ausgeglichen wird. Wir setzen hierbei also voraus, daß das reagierende Gebilde sich in einem stabilen Zustande befindet. Bestände dieses (zuerst von Le Chatelier allgemein ausgesprochene) Naturgesetz nicht, so würde die Ursache immer verstärkt, die Reaktion immer mehr beschleunigt werden, wie es auch in einem instabilen System tatsächlich der Fall ist (z. B. Dynamit, dessen Vergasung durch einen plötzlichen Druck, oder Gesteinsglas, dessen Entglasung durch Temperaturerhöhung eingeleitet ist). Nun ist bei der obigen Reaktion die Bildung von Kieseldioxyd und Flußsäure mit einer beträchtlichen Wärmeentwickelung verknüpft, die genannten Stoffe werden sich also bei Temperaturabnahme aus den beiden anderen bilden. Eine ähnliche Betrachtung, wieder an der Hand des Le Chatelierschen Prinzips, können wir auf den Druck anwenden. Druckentlastung begünstigt die Bildung des Systems mit dem größten Volumen. Nun ist in der obigen Gleichung die Menge des Kieseldioxyds in Dampfform sehr gering und kann daher vernachlässigt werden, es gehen also bei der Reaktion von links nach rechts 3 Moleküle ($SiF_4 + 2H_2O$) in 4 Moleküle HF über, d. h. die Bildung von festem Quarz und gasförmiger Flußsäure wird bei Druckentlastung stattfinden. Jetzt können wir den Prozeß der Pneumatolyse für diesen Fall genau übersehen: bei hoher Temperatur und großem Druck wird Quarz von Flußsäure aufgelöst, bei Abkühlung und Druckentlastung, also auf dem Wege des Dampfes nach der Erdoberfläche, wird Quarz wiederum ausgeschieden.

Was hier (nach Marc) für ein konkretes einfaches Beispiel durchgeführt wurde, wird in der Zukunft auf manche pneumatolytische Prozesse ein neues Licht werfen oder seine quantitative Behandlung ermöglichen können.

Soweit die flüchtigen Magmenbestandteile nicht im Eruptivgestein selbst festgelegt werden, dringen sie in das Nebengestein ein, wo sie sich entweder allmählich verfestigen unter Bildung von Mineralgängen und Erzlagerstätten oder unter günstigen Umständen mit diesem Nebengestein chemische Reaktionen eingehen. Derartige Vorgänge bezeichnet man als exogene Pneumatolyse. Selbstverständlich sind

[1]) Marc, Vorlesungen über die chemische Gleichgewichtslehre und ihre Anwendung auf die Probleme der Mineralogie, Petrographie und Geologie, Jena 1911, S. 14 bis 16.

verschiedene Gesteine sehr verschieden zu solchen Reaktionen geeignet. Während die Pneumatolyse bei einem Tonschiefer, abgesehen von bloßen Hitzewirkungen, meist nur schwache Spuren hinterläßt (manchmal Bildung von Topasfels, Turmalinhornfels) liegt im Kalkstein und Dolomit ein chemisch sehr reaktionsfähiger Körper vor. Die magmatischen Dämpfe werden in Carbonatgesteinen wie in einem Filter oder einer Absorptionsvorrichtung festgehalten. Mineralneubildungen und die Entstehung von Erzlagerstätten durch Pneumatolyse sind daher besonders im Kalkstein zu Hause. Man nennt die Umwandlung eines Gesteins durch chemische Reaktion, „Molekül für Molekül", Metasomatose.

Namentlich V. M. Goldschmidt (Die Kontaktmetamorphose im Kristianiagebiet, Kristiania 1911 S. 211 bis 226) hat in neuerer Zeit auf die hier besprochenen Verhältnisse bei einer ausführlichen Untersuchung der Kontaktgesteine im Kristianiagebiet hingewiesen. Nehmen wir als Beispiel (nach Goldschmidt) die Bildung der nichtflüchtigen Minerale Eisenglanz und Flußspat aus flüchtigem Eisenfluorid

$$2FeF_3 + 3CaCO_3 = Fe_2O_3 + 3CaF_2 + 3CO_2.$$

Auch schwach eisenfluoridhaltige Dämpfe können auf die Dauer eine große Menge Eisenglanz (und Flußspat) in dieser Weise ablagern. Durch Tonschiefer hätte derselbe Dampf ungehindert, also ohne Erzbildung, hindurchstreichen können.

Auch die Bildung der weitverbreiteten Kalkeisensilikatgesteine, sogenannte Skarngesteine, aus Kalkstein durch exogene Pneumatolyse ist in derselben Weise verständlich. Wenn auch die Untersuchungen auf diesem Gebiet noch meist im beschreibenden und deduktiven Stadium stecken, so dürften doch den Versuchen zur quantitativen experimentellen Bestätigung keine erheblichen Schwierigkeiten im Wege stehen.

Literatur. *Eine Anzahl wichtiger Arbeiten sind in dem Artikel selbst zitiert. An zusammenfassenden Werken, aus denen auch die Literatur des Gegenstandes zu entnehmen ist, seien genannt:* ***R. Brauns,*** *Chemische Mineralogie. Leipzig 1896. —* ***A. Harker,*** *The natural History of igneous Rocks. London 1909. —* ***R. Marc,*** *Vorlesungen über die chemische Gleichgewichtslehre und ihre Anwendung auf die Probleme der Mineralogie, Petrographie und Geologie. Jena 1911. —* ***F. Rinne,*** *Praktische Gesteinskunde, 3. Aufl. Hannover 1908. —* ***J. H. L. Vogt,*** *Die Silikatschmelzlösungen. Kristiania 1903 bis 1904. —* ***C. Doelter,*** *Handbuch der Mineralchemie. Dresden 1911.*

H. E. Boeke.

Mineral- und Gesteinsbildung

auf wässerigem Wege.

1. Allgemeine Gesetze. 2. Die reagierenden Stoffe. 3. Die Art der Reaktion. 4. Vorgänge innerhalb der Erdrinde. 5. Vorgänge auf der Erdoberfläche. 6. Die Umwandlung.

1. Allgemeine Gesetze. Wie man bei der Bildung der eruptiven und metamorphen Mineralien und Gesteine schon gesehen hat, handelt es sich bei jeglicher Mineral- und Gesteinsbildung um die Einstellung von Gleichgewichten. Diese werden verschoben mit der Aenderung von Druck und Temperatur. Bei den Eruptivmineralien stellen sich diese Gleichgewichte im allgemeinen bei sehr hoher Temperatur (ca. 1000°) und teils unter erhöhtem Druck teils unter Atmosphärendruck ein (Tiefen- und Ergußgesteine). Bei den pneumatolytischen Mineralien und Gesteinen liegen Druck und Temperatur tiefer. Bei den metamorphen Mineralien und Gesteine spielt die Steigerung von Druck und Temperatur die wesentlichste Rolle. Bei der Entstehung der hier zu betrachtenden Mineralien und Gesteine hat man es mit annäherndem Atmosphärendruck und einer wenig um das Jahresmittel schwankenden Temperatur zu tun. Natürlich gibt es alle möglichen Uebergänge zur metamorphen Entstehung, aber wir ersehen doch aus dem Gesagten, daß der Ort der Entstehung für unsere Mineralien und Gesteine auf der Erdoberfläche oder doch in der äussersten Schale der Erdrinde gelegen ist, denn das Wasser dürfte als solches kaum wesentlich tiefer in die Erde eindringen als bis zu einer Tiefe, in der die Temperatur ca. 120° beträgt, was in etwa 4000 m erreicht sein wird.

Aus dem Obigen ergibt sich, daß bei der Bildung das Volumgesetz wirkungslos sein muß und ebenso das Riekesche Prinzip. Hingegen spielt die Wärmetönung eine Rolle, indem die Bildung derjenigen Stoffassoziationen gefördert wird, welche eine positive Wärmetönung besitzen, d. h. bei ihrer Bildung Wärme erzeugen. Danach werden sich z. B. mit Vorliebe hydroxyl- und wasserhaltige Silikate bilden. Weiterhin spielt die Massenwirkung eine nicht unwesentliche Rolle insofern, als in dem andauernd bewegten Grundwasserstrom beim Zusammentreffen eines sonst beständigen Minerals mit anderen Lösungen sich Reaktionen vollziehen, die sonst nicht zustande kommen. Ein Beispiel möge dies erläutern: Bringt man kohlensaures Eisenoxydul und schwefelsauren Kalk zusammen, so bildet sich kohlensaurer Kalk und schwefelsaures Eisenoxydul; läßt man aber über kohlensauren Kalk längere Zeit Lösungen von

schwefelsaurem Eisenoxydul laufen, so vollzieht sich der umgekehrte Prozeß, weil der gebildete schwefelsaure Kalk immer wieder weggeführt wird und sich so immer ein neues Gleichgewicht einstellt.

2. Die reagierenden Stoffe. Fernerhin ist natürlich die Art der miteinander reagierenden Stoffe von ausschlaggebender Bedeutung. Hierbei kommen in Betracht: die Mineralien der Erdrinde, das Wasser und die darin gelösten Bestandteile, die Bestandteile der Atmosphäre und endlich die aus den Vulkanen entweichenden Gase und Dämpfe. — Die Mineralien der Erdrinde sind eben alle Mineralien, die man kennt, und es wird schwer, aus ihrer Fülle einzelnes hervorzuheben. Jedoch beachte man in Rücksicht auf die großen Prozesse der Natur, daß der Menge nach ein sehr großer Teil der Mineralien aus dem Schmelzfluß gebildete Silikate sind, die auch in den metamorphischen Gesteinen eine wesentliche Rolle spielen. In den Sedimenten hingegen treten Karbonate, Chloride, Sulfate, auch Sulfide in den Vordergrund. Auch Ablagerungen organischer Natur (tierische und pflanzliche Reste) dürfen nicht übersehen werden, weil sie bei ihrer Fäulnis neben Kohlensäure reduzierende organische Substanzen liefern. — In dem auf und in der Erde zirkulierenden Wasser sind vielerlei Stoffe gelöst. Wenn man ganz absieht von den leichtlöslichen Salzen der Salz- und Schwefelsäure, sind es auch von anderen Stoffen, die sonst als unlöslich gelten, in Anbetracht der der Natur zur Verfügung stehenden ungeheuren Wassermengen und Zeiträume gewaltige Massen, welche in Lösung zirkulieren. So z. B. sind in einem Liter reinen Wassers 13 mg kohlensaurer Kalk und 1,25 mg Schwerspat löslich. In kohlensäuresattem Wasser steigt aber die Löslichkeit des kohlensauren Kalkes schon auf 1300 mg im Liter. Daraus ersehen wir, daß eigentlich alle Mineralien im Wasser löslich sind. Es kreisen an der Erdoberfläche etwa 1300 Millionen Kubikkilometer Wasser und innerhalb derselben etwa ebensoviel. Die Atmosphäre besteht hauptsächlich aus Stickstoff und Sauerstoff, von denen der erstere fast unwirksam bleibt, während der letztere als Oxydationsmittel für die Eisenoxydulverbindungen eine große Rolle spielt. Daneben sind aber noch eine Reihe anderer sehr wichtiger Stoffe vorhanden, die eben durch die ungeheure Menge der Atmosphäre ihre Bedeutung erlangen. Es sind dies: die Kohlensäure, die Salpetersäure, der Schwefelwasserstoff, die Schwefelsäure, die Salpetersäure, das Ammoniak und auch allerlei in derselben als Staub vorhandene Salze, wie das Chlornatrium. Aus den vulkanischen Magmen kommen mancherlei Gase, auch solche, die bei gewöhnlicher Temperatur nicht flüchtig sind, zur Emanation. Als da sind: Kohlensäure, Kohlenoxyd, Chlor, Salzsäure, Schwefelsäure, Schweflige Säure, Schwefelwasserstoff, Kohlenwasserstoffe, dann Kalium- und Natriumchlorid, Salmiak, Siliciumchlorid und -Fluorid, viele Chloride und Fluoride anderer Metalle, auch Borsäure. Diese Stoffe können miteinander und mit den übrigen reagieren, und es ist besonders zu beachten, daß die vulkanischen Gase im allgemeinen eine reduzierende Wirkung ausüben.

3. Die Art der Reaktion. Die in der Atmosphäre vorhandenen Stoffe werden durch Regen und Schnee niedergeschlagen und gelangen so in das Wasser, oder sie werden von den Mineralien direkt adsorbiert. Die Emanationsprodukte der Vulkane gelangen entweder in gleicher Weise zur Reaktion, oder sie werden infolge der Abkühlung oder durch das in der Erde zirkulierende Wasser schon innerhalb der Erdrinde festgehalten.

Aus dem Vorstehenden ergibt sich, daß man die wesentlichsten Vorgänge unter folgenden Begriffen zusammenfassen kann: Wasseraufnahme, Lösung, Verdunstung, chemische Umsetzung, Oxydation, Reduktion. Natürlich können auch mehrere dieser Prozesse gleichzeitig stattfinden. Wir greifen aus der reichen Fülle der Vorgänge einige besonders wichtige als Beispiele heraus. Aus den wasserfreien Mineralien der Eruptivgesteine werden wasserhaltige, aus dem wasserfreien schwefelsauren Kalk (Anhydrit) wird Gips. Durch kohlensäurehaltige Gewässer wird der kohlensaure Kalk aufgelöst, durch das reine Wasser werden die leichtlöslichen Salze der Erdrinde in Lösung gebracht. Die Verdunstung des Meerwassers führt zur Abscheidung der darin gelösten Salze. Die Einwirkung der Kohlensäure, Salz- und Schwefelsäure auf die Silikate führt zur Austreibung der schwächeren Kieselsäure und zur Bildung der entsprechenden Karbonate, Chloride und Sulfate. Der durch Verwesungsprozesse organischer Substanzen entstehende Schwefelwasserstoff kann aus zirkulierenden Schwermetallösungen die Schwermetalle als Sulfide fällen. Oxydierende wässerige Lösungen verwandeln das Eisenoxydul der Mineralien in wasserhaltige Eisenoxyde um. Reduzierende Lösungen bringen das Umgekehrte hervor und machen so das Eisen in kohlensäurehaltigem Wasser löslich. Bei den Reaktionsvorgängen scheinen nach den neueren Untersuchungen auch die kolloidalen Zustände der Mineralkörper eine Rolle zu spielen, doch sind die Untersuchungen hierüber kaum über das Anfangsstadium hinausgekommen.

Es ist ohne weiteres einleuchtend, daß bei solchen Vorgängen im allgemeinen immer

eine Scheidung in zwei Teile stattfindet in einen unlöslichen und einen löslichen Anteil. Der letztere wird von dem innerhalb oder außerhalb der Erdoberfläche stets zirkulierenden Wasser fortgeführt, der erstere bleibt innerhalb der Erdoberfläche in situ und kann außerhalb durch das strömende Wasser, durch den Wind oder durch das Eis ebenfalls eine Ortsveränderung erfahren.

4. Vorgänge innerhalb der Erdrinde. Betrachten wir zunächst die Vorgänge innerhalb der Erdrinde, so werden sie einerseits zur Verwitterung des vorhandenen Gesteines führen (vgl. den Art. „Verwitterung"), und andererseits wird eine Lösung fortgeführt werden. Mit der Lösung können nun verschiedene Dinge geschehen: 1. Sie kann in größere oder kleinere Hohlräume gelangen. Ist sie bei höherer Temperatur oder bei erhöhtem Druck gesättigt, so kann unter Aenderung der physikalischen Bedingungen oder durch Verdunstung des Lösungsmittels eine Abscheidung erfolgen. Geschieht dies in den Poren eines lockeren Gesteins (z. B. Sand), dann wird das Gestein dadurch verkittet und fest (z. B. Sandstein). Ist der Ort der Ablagerung ein größerer Hohlraum, dann entstehen Geoden, Drusen, Mandeln, Kristallkeller, Mineralhöhlen, oder bei Spaltenausfüllungen Gänge. Derartige Bildungen nennt man Sekretionen und wenn der Stoff der neugebildeten Mineralien aus dem Nebengestein stammt, bezeichnet man den Vorgang als Lateralsekretion. 2. Die Lösung kann auf ihrem Wege mit einer anders beschaffenen Lösung oder auch mit vulkanischen Gasen zusammentreffen, Dann erfolgt eine chemische Umsetzung nach dem Gesetz, daß sich von zwei möglichen Körpern immer der schwerer lösliche bildet, wobei natürlich aber auch die Massenwirkung eines wesentliche Rolle zu spielen vermag. So haben sich besonders viele Mineral- und Erzgänge (siehe daselbst) gebildet. In die Augen springend ist dies dort, wo solche Gänge innerhalb ganz bestimmter Schichten besonders reich an bestimmten Erzen oder Mineralien sind. 3. Vollziehen sich die unter 2. genannten Vorgänge in ganz lockeren meist neugebildeten Gesteinen (Sand, Schlamm, Staub) oder im Wasser, dann können Konkretionen zustande kommen (Gips, Schwefelkies, Mangan- und Feuersteinknollen), die unter Umständen erhebliche Mengen des Gesteins miteinschließen (Kalkspat mit Sand = kristallisierter Sandstein, Schwerspat mit Sand, Kalkspat mit Ton = Lößpuppen und Imatrasteine usw.) 4. Die Lösungen gelangen in andere Gesteine, mit deren Bestand sie sich chemisch umsetzen können, dann bilden sich neue Mineralien an Stelle der alten (Diagenese). So z. B. wird ein Kalkstein, der bei gleichzeitiger Gegenwart von reduzierenden Substanzen von Eisenoxydulsalzlösungen durchströmt wird, in Spateisenstein, und wenn er von konzentrierten Magnesiumkarbonatlösungen imprägniert wird, in Dolomit umgewandelt. Bei Gegenwart von reduzierenden Substanzen wird durch kohlensäurehaltiges Wasser ein Feldspat in Kaolin, ohne ihre Gegenwart in einen eisenhaltigen Ton zersetzt. Einem ähnlichen Prozesse verdankt der Raseneisenstein (Eisenhydroxydkonkretion unter kalkarmen Mooren) und der Ortstein (durch Eisenhydroxyd verkitteter Sandstein auf wasserundurchlässiger Unterlage) seine Entstehung. Er verläuft in folgender Weise: Das Eisen löslich machende Wirkung der reduzierenden Zersetzungsprodukte der Humussäuren; Bildung von Ferrokarbonat durch die dabei gebildete Kohlensäure; durch Oxydation Umbildung in freie Kohlensäure und Eisenhydroxyd.

5. Vorgänge auf der Erdoberfläche. An der Erdoberfläche verlaufen diese Vorgänge etwas anders. Der unlösliche Anteil der verwitterten Gesteine und Mineralien kann durch Wind, Wasser oder Eis transportiert an andere Stelle gelangen, indem er dort wieder abgesetzt wird, wo die Strömung des Windes oder Wassers nachläßt oder das Eis schmilzt. So entstehen die sogenannten klastischen oder Trümmergesteine. Es findet dabei eine Art Auslese statt, indem das Material beim Transport durch Wind oder Wasser einerseits gesondert wird nach der Korngröße und nach dem spezifischen Gewicht (Edelstein-, Goldseifen, usw.) und andererseits dadurch, daß die weicheren, leichter spaltbaren, leichter löslichen Mineralien schon nach kürzerem Transport im Wasser gänzlich zerstört werden. So kommt es, daß der harte, nicht spaltbare, sehr schwer lösliche Quarz in Form von Sand und Sandstein so gewaltige Anhäufungen bildet. Bei dem Transport durch das Eis findet eine solche Auslese nicht statt; es ist grobes und feines Material gemengt und die löslichen Bestandteile sind nicht wie beim Wasser ausgelaugt. Die Ablagerungen des Wassers sind geschichtet (vgl. den Artikel „Schichtung"), die des Eises und Windes dagegen nicht. Der gelöste Anteil dringt entweder in die Gesteine ein oder fließt talab nach den Bächen und Flüssen und vermischt sich dort mit den Lösungen, die in Form von Quellen aus dem Erdinnern zutage treten. Führen die zutage tretenden Quellwasser größere Mengen gelöster Bestandteile so kann deren Absatz schon an der Mündung erfolgen. Dies geschieht z. B. durch Abkühlung der Lösung in Form von Ueberzügen sog. Sintern (Kieselsinter, Arago-

nitsinter, Erbsensteine), oder durch Entweichen halbgebundener Kohlensäure (Aragonit- und Kalksinter), oder durch Verdunsten (Kalksinter, Stalaktiten, Stalagmiten), oder endlich durch Oxydation (z. B. Ferrolösungen unter Bildung von wasserhaltigen Eisenoxyden). Im übrigen fließt dann das gesamte Wasser durch Bäche und Flüsse den Süßwasseransammlungen und dem Meere zu. Hier kann ihre Abscheidung auf doppeltem Wege erfolgen: Entweder organisch oder anorganisch. Der letztere Weg kann im Süßwasser dem ähnlich sein, den wir eben von der Quellmündung kennen gelernt haben (Seeerze), oder das Entziehen der halbgebundenen Kohlensäure geschieht durch deren Assimilation durch Wasserpflanzen, welche dann mit Kalkspat inkrustiert werden (Kalkstuff). In den abflußlosen Seen und im Meere erfolgt die Abscheidung auf anorganischem Wege entweder durch Verdunstung des Wassers (Salzlager, siehe daselbst), oder durch Zusammenwirken mehrerer Lösungen, wie bei der Bildung von Manganknollen und der Zeolithe (Philipsit) in der Tiefsee oder der Glaukonite an tropischen flußlosen Meeresküsten. Oder aber es werden durch die bei den Fäulnisprozessen der Organismen entstehenden kohlensauren Salze des Ammoniums und Natriums aus dem schwefelsauren Kalk des Meerwassers Kalke und Dolomite gefällt (vgl. den Artikel „Karbonatgesteine"). Alle auf solchem anorganischen Wege gebildeten Sedimente bezeichnet man als minerogene oder physikalisch-chemische Sedimente.

Der letzte Weg der Abscheidung der gelösten Bestandteile ist der auf organischem Wege, derart daß die abgeschiedenen Mineralien an dem Kreislauf des Blutes der Tiere oder des Saftes der Pflanzen teilgenommen haben. Man kann so bei diesen organogenen Sedimenten zwischen zoogenen (tierischen) und phytogenen (pflanzlichen) unterscheiden. Die Neubildungen sind entweder organischer (kohliger) oder anorganischer Natur. Im ersteren Fall entstehen Kohlen und Bitumina (siehe daselbst). Die anorganischen Neubildungen bestehen aus kohlensaurem Kalk oder aus wasserhaltiger Kieselsäure (Opal). Beiderlei Arten kommen sowohl bei Tieren als bei Pflanzen vor (z. B. Kieselschwämme — Kalkschwämme, Kieselalgen — Kalkalgen). Es ist anzunehmen, daß die Organismen, welche Kieselsäure abscheiden, diese als solche aus dem Wasser aufnehmen und dort leben, wo sie reichlich vorhanden ist (z. B. Kieselalgen in manchen Süßwasserseen und in breitem Gürtel um die Antarktis, Radiolarien in der Gegend von Barbados). Den kohlensauren Kalk nehmen die Tiere und Pflanzen des Süßwassers und an den Meeresküsten, an denen kalkreiche Flüsse münden, offenbar als solchen auf. In dem offenen Meere hingegen, wo es an kohlensaurem Kalk mangelt, müssen sie ihn erst aus dem schwefelsauren Kalke des Meerwassers bilden. Beim Tode der Organismen fällt dann, soweit es sich nicht um riffbauende Tiere und Pflanzen handelt, das Hartgebilde auf den Grund nieder und bildet dort einen feinen, später erhärtenden Schlamm. Nur in einem großen Teil des Stillen Ozeans findet man an Stelle des kalkigen Schlammes den feinen blauen Tiefseeton, weil die Kalkgebilde unter dem Einflusse des Druckes und des aus der Antarktis stammenden kohlensäurereichen Wassers beim Niedersinken aufgelöst werden.

6. Die Umwandlung. Die Form (Modifikation), in der ein chemischer Körper in der Natur abgeschieden wird, ist oft nicht dieselbe, in der wir ihn nachträglich finden, sondern es hat sich inzwischen eine Umlagerung vollzogen, manchmal unter Einhaltung der ersten Kristallform (Paramorphosen vgl. den Artikel „Afterkristalle"). Es hat dies seinen Grund darin, daß bei der Bildung häufig nicht gleich die bei gewöhnlicher Temperatur und Normaldruck beständige Modifikation (Polymorphismus vgl. den Artikel „Kristallchemie") entsteht, sondern eine instabile, die sich erst im Laufe der Zeit in die stabile umlagert. So z. B. scheidet sich aus heißem Wasser oder auch aus solchem mit größeren Mengen von Magnesiumsalzen der kohlensaure Kalk nicht in der allein beständigen Modifikation des Kalkspats sondern in der des Aragonits oder Vaterits ab. Auch die Hartgebilde von Tieren und Pflanzen sind vielfach Aragonit oder Vaterit. Diese beiden verfallen nun besonders bei der Fossilisation unter der Einwirkung kohlensäurehaltigen Wassers sehr schnell der Umwandlung zu Kalkspat. Die Kohlensäure entsteht in den kalkigen organischen Sedimenten durch die Fäulnisprozesse der organischen Substanzen und so kommt es, daß solche Sedimente infolge der Umkristallisation sehr schnell erhärten.

Literatur. *G. **Bischof**, Lehrbuch der chemischen und physikalischen Geologie, II. Aufl. Bonn 1863. — **Justus Roth**, Allgemeine und chemische Geologie. Berlin 1879. — **C. Dölter**, Handbuch der Mineralchemie. Dresden 1911. — **K. Andrée**, Die Diagenese der Sedimente, geologische Rundschau Bd. II, 1911, S. 117. — **A. Himmelbauer und R. Marc**, Ueber Kolloidchemie und Mineralogie, Fortschritte der Mineralogie III. Bd., 1913. — Vgl. außerdem folgende Artikel dieses Handwörterbuches: „Erzlagerstätten", Gesteinseinteilung", „Kreislauf der Stoffe", „Mineralien".*

*G. **Linck**.*

Mineral- und Gesteinsbildung
auf dem Wege der Metamorphose.

1. Einleitung: a) Metamorphe Gesteine. b) Erscheinungsformen der Metamorphose. c) Wesen der Metamorphose. 2. Faktoren der Metamorphose: a) Die Konzentration der beteiligten Stoffe. Massenwirkungsgesetz. Phasenregel. Lösungsmittel. b) Temperatur. Van 't Hoffsches Temperaturgesetz. Wärmetönung. Sammelkristallisation. Wärmequellen. c) Druck. Gesetz von Le Chatelier. Volumgesetz. Druckgleichung für den Umwandlungspunkt. Volumenänderung. d) Arten des Druckes. α) Allseitiger Druck. β) Gerichteter Druck (Streß). Prinzip von Riecke. e) Plastizität der Gesteine und bruchlose Umformung. Kataklase. f) Individuelle Faktoren. Chemismus des Ausgangsmaterials. Korngröße. 3. Arten der Metamorphose und ihre Produkte. a) Vorwiegend mechanisch wirkender Streß. Kataklastische Umformung. b) Kombinierte Wirkung von Druck und Temperatur. Kristalline Schiefer im engeren Sinn. Zonenlehre. Schwierigkeiten in der Abgrenzung. Diagenese. c) Vorherrschaft der Temperaturwirkung, erzeugt durch vulkanische Intrusion. Kontaktmetamorphose. Gewöhnlicher und pneumatolytischer Kontakt. Injektionsmetamorphose. Einschmelzmetamorphose.

1. Einleitung. 1a) Metamorphe Gesteine. In der neueren Gesteinskunde unterscheidet man neben den großen Abteilungen der Erstarrungsgesteine und der Sedimente noch eine ihnen genetisch gleichwertige Abteilung der metamorphen Gesteine, welche aus einer Umwandlung (Metamorphose) jener Gesteinsarten hervorgegangen sind. Letztere bewahren dabei im großen und ganzen ihren stofflichen Gehalt; daher liefern Ausgangsgestein und metamorpher Abkömmling in der quantitativen chemischen Analyse im wesentlichen dieselben Resultate und es gehen die durch die Metamorphose erzeugten Abweichungen kaum je soweit, daß der chemische Charakter des Ursprungsgesteins vollständig verwischt würde; ferner bestehen sowohl zwischen den verschiedenen Erstarrungsgesteinen und ihren metamorphen Derivaten, als auch zwischen den Sedimenten und ihren Abkömmlingen alle möglichen Uebergänge, so daß in einem und demselben Gesteinskomplex Anfangs- und Endstadien der Metamorphose beobachtet werden können.

1b) Erscheinungsformen der Metamorphose. Der Umwandlungsprozeß schlägt verschiedene Wege ein. Manchmal werden die Gemengteile des Ausgangsgesteins einfach zerbrochen, zerstückelt, aneinander verschoben und zu Linsen oder Streifen ausgezogen, oder aber, — was häufiger ist — sie unterliegen einer Umkristallisation oder sogar einer vollständigen Ummineralisation, in welch letzterem Falle das metamorphe Gestein einen vom Ursprungsgestein gänzlich verschiedenen Mineralbestand erhält. Hierbei kann einfach eine neue Komponente an die Stelle einer alten treten (Hornblende an die Stelle von Augit) oder aber diese muß sich in mehrere spalten (Plagioklas in Zoisit, Quarz und Albit); endlich können mehrere Ausgangsmineralien sich auch zu einer einzigen neuen Komponente summieren (Wollastonit und Andalusit zu Anorthit) oder auch wieder in eine Mehrzahl neuer Formen übergehen (Augit und Anorthit in Granat und Quarz). Solche Umwandlungen wurden beobachtet in den Kontakthöfen von Intrusivgesteinen und an Gesteinsmassen von besonders tief liegenden oder stark verfalteten Teilen der Erdrinde. Heute ist man bestrebt, durch das Experiment und die Feststellung der zugrunde liegenden chemisch-physikalischen Gesetze den Erscheinungen und Vorgängen der Metamorphose näher zu treten, in ähnlicher Weise, wie dies für die Entstehungsweise chemischer Sedimente geschah durch die Arbeiten von van t' Hoff und seiner Schüler (vgl. Ozeanische Salzablagerungen) und für diejenige der Erstarrungsgesteine in vorbildlicher Weise eingeleitet worden ist durch die synthetischen Experimente von Arthur L. Day, E. T. Allen, E. S. Shepherd u. a. am geophysikalischen Laboratorium des Carnegie-Institutes in Washington.

1c) Wesen der Metamorphose. Die Eigenart dieses Vorganges ist zunächst darin begründet, daß das sich umwandelnde Gestein zwar als Ganzes fest bleibt, daß aber vermöge der ihm innewohnenden Gesteinsfeuchtigkeit immer minimale Mengen desselben gelöst und daher reaktionsfähig sind, so daß der im Wandel begriffene Gesteinsanteil in diesem Falle aufgefaßt werden kann als eine „Lösung mit sehr vielen Bodenkörpern". Die für solche Lösungen geltenden Gesetze können daher auch hier Anwendung finden. — Theoretisch kann jedes Gestein angesehen werden als ein chemisches System, das unter den gegebenen Umständen sich in einem bestimmten Gleichgewichtszustand befindet. Tritt in den bestehenden Konzentrations-, Temperatur- und Druckverhältnissen eine Verschiebung ein, so wird dieses Gleichgewicht gestört und die Vorgänge der Metamorphose entspringen alsdann einem Streben, diese Störung wieder auszugleichen und einen neuen Gleichgewichtszustand herzustellen. Hierbei ist zu beachten, daß, wie die anderen chemischen Verbindungen, so auch die gesteinsbildenden Mineralien ihre Existenzfelder haben und daher jedes von ihnen nur innerhalb eines gewissen Temperaturintervalls bestehen kann, dessen Grenzen durch Druck beeinflußt und außerdem von dem stofflichen Inhalt (der Konzentration) des Systems abhängig sind.

Für polymorphe Substanzen sind diese Verhältnisse im Prinzip schon lange bekannt und für manche, z. B. für Schwefel, jetzt ähnlich für SiO_2, auch zahlenmäßig bestimmt. Aus irgendwelcher Stoffkombination wird daher nur innerhalb einer gewissen, vom Druck abhängigen Temperatur ein bestimmtes Mineral hervorgehen können; wird dieselbe nicht eingehalten, so entsteht aus dem gleichen Stoff ein anderes Mineral. So kann beispielsweise aus bestimmten Mengen von (MgO, FeO), Al_2O_3 und SiO_2) in niederer Temperatur Chloritoid, bei höheren Temperaturen Staurolith und in den höchsten Hitzegraden Cordierit hervorgehen. Sind in einem Gestein alle Komponenten unter den veränderten physikalischen Bedingungen bestandfähig, so wird dasselbe der neuen Gleichgewichtslage angepaßt sein. Die Feststellung der Existenzfelder für metamorphe Mineralien und Gesteine bildet eine wichtige Aufgabe der Zukunft.

2. Faktoren der Metamorphose. 2a) Die Konzentration der beteiligten Stoffe. Massenwirkungsgesetz. Phasenregel. Lösungsmittel. Der Gang der Metamorphose wird vor allem zunächst bedingt durch die Art und Menge der in Aktion tretenden Stoffe. Dabei kommt wohl in erster Linie das von Guldberg und Waage aufgestellte Massenwirkungsgesetz in Betracht, welches in seiner einfachsten Formulierung sagt, „die chemische Wirkung eines Stoffes ist proportional seiner wirksamen Masse“. Bildet sich z. B. in einem sich umwandelnden Gesteinskörper Anorthit an Stelle von Andalusit und Wollastonit: ($Si_2O_8Al_2Ca = SiO_5Al_2 + SiO_3Ca$), so wird die Menge des entstehenden Anorthits um so größer werden, je mehr SiO_3Ca neben SiO_5Al_2 zur Verfügung steht.

Die mathematische Formulierung des Massenwirkungsgesetzes, die zugleich erlaubt, nicht nur die Qualität, sondern auch die Quantität der eintretenden Veränderungen anzugeben, lautet: „Der Quotient aus den Produkten der Konzentration der reagierenden und der entstehenden Stoffe ist für gegebene Drucke und Temperaturen eine Konstante (K).“ Für eine chemische Gleichung: $A + B = D + E$ mit den Konzentrationen C_A, C_B, C_D, und C_E ergäbe sich die Formel:

$$K = \frac{C_A \times C_B}{C_D \times C_E}$$

Dieselbe gilt uneingeschränkt allerdings nur für homogene Systeme. Daß sie sich aber auch für die hier in Betracht kommenden heterogenen Systeme (mit Bodenkörpern) weitgehend verwenden läßt, erhellt aus folgendem Beispiel, das im pneumatolytischen Kontakt häufig realisiert wird. Nach der chemischen Gleichung: $SnCl_4 + 2H_2O \rightleftharpoons SnO_2 + 4HCl$ führt die Reaktion zwischen Zinnchlorid und Wasser zur Bildung von Zinnstein und Salzsäure. Das Massenwirkungsgesetz ergäbe für dieses Gleichgewicht:

$$K = \frac{C_{SnCl_4} \times C^2_{H_2O}}{C_{SnO_2} \times C^4_{HCl}} : \frac{C_{SnCl_4} \times C^2_{H_2O}}{C^4_{HCl}} = K_1$$

da SnO_2 als „Bodenkörper“ aus dem Gleichgewicht ausscheidet. Daraus ist unmittelbar ersichtlich, daß eine Erhöhung der Wasserdampfkonzentration das Gleichgewicht zugunsten der Salzsäure — und demzufolge auch des ausfallenden Zinnsteins — verschieben muß.

Nach Früherem liegt nun bei der Metamorphose in der Regel eine „Lösung mit Bodenkörpern“, also ein heterogenes System vor, in welchem eine Mehrzahl von Komponenten in vorwiegend 2 Phasen (flüssig und fest) vorhanden ist, so daß es sich lohnt, die möglichen Vorgänge unter dem Gesichtspunkt der für solche Verhältnisse geltenden Phasenregel von Willard Gibbs ins Auge zu fassen. Ihre einfachste Fassung lautet: „Es herrscht vollständiges Gleichgewicht, wenn n Stoffe in (n + 1) Phasen zusammentreten; sind weniger Phasen vorhanden, so ist das Gleichgewicht ein unvollständiges.“

Sie stellt somit einen Zusammenhang her zwischen der Zahl der Komponenten, aus denen ein System sich aufbaut und der Anzahl der auf sie sich verteilenden Phasen gegenüber den möglichen Veränderungen von Konzentration, Temperatur und Druck, denen es unterworfen werden kann. Ihre mathematische Fassung wird gewöhnlich gegeben durch die Formel:

$$F = (K + 2) - P,$$

worin F die Zahl der möglichen Veränderungen (Freiheiten), K die Zahl der unabhängigen Komponenten und P die Anzahl der Phasen (d. h. der durch eine scharfe, augenfällige Grenze von der Umgebung abgetrennten Bausteine des Systems) bedeutet. Mehrere feste Bodenkörper stellen somit ebenso viele getrennte Phasen dar; ein Bodenkörper in seiner gesättigten Lösung repräsentiert eine feste und eine flüssige Phase und darüber existiert dann in der Regel noch eine dampfförmige Phase. In dem Gleichgewicht: $CaO + CO_2 \rightleftharpoons CaCO_3$ sind allerdings drei Komponenten vorhanden, allein doch nur zwei unabhängige, indem aus ihnen der dritte seiner Art nach schon bestimmt ist.

Die Gibbssche Phasenregel ist bis jetzt für die Mineralbildung durch Metamorphose wenig verwendet worden, weil schon Systeme mit 4 Stoffen sehr große Komplikationen aufweisen und in der Gesteinsmetamorphose meist mehrstoffige Systeme auftreten. Neuerdings hat aber V. M. Goldschmidt in seiner „Untersuchung über die Kontaktmetamorphose im Kristianiagebiet“ die Phasenregel für die Zwecke der Gesteinsmetamorphose sehr einfach formuliert, indem er sie an die Form der Gesetze für die Bildung von Doppelsalzen anschloß und ihr die Form gab: „Die maximale Anzahl der festen Mineralien, die gleichzeitig nebeneinander stabil existieren können, ist gleich der Anzahl

n der Einzelkomponenten, die in den Mineralien enthalten sind." Nur im Umwandlungspunkt sind (n + 1) Mineralien stabil. Gegenüber der Formulierung nach W. Gibbs bleiben hier die gesättigte Lösung, oder statt ihrer der Dampf, als eine Phase vorausgesetzt.

Angenommen, es bestehe ein sich umwandelndes Gestein aus den Stoffen CaO.MgO, Al_2O_3 K_2O und SiO_2, so können demnach im fertigen Umwandlungsprodukt bei vollkommenem Gleichgewicht nur 5 Mineralien stabil nebeneinander auftreten. Stabil ist ein solches System aber dann, wenn trotz der Gegenwart eines gemeinsamen Lösungsmittels keine Umsetzung zwischen den einzelnen Mineralien stattfindet. Als Beispiel möge ein einfaches Tongestein der Metamorphose unterliegen, dessen Zusammensetzung durch die vorhandenen Stoffe SiO_2,(Al_2O_3, Fe_2O_3) und (MgO,FeO) gegeben sei. Demgemäß müssen neben der gesättigten Lösung 3 Mineralien bei bestimmten Temperaturen und Drucken bestandfähig sein. Angenommen, die Temperatur sei hoch, so ergibt sich: $7SiO_2 + 3Al_2O_3 + 2MgO = SiO_2 + SiO_5Al_2 + Si_5O_{18}Al_4Mg_2$ (Quarz, Andalusit, Cordierit) oder: $7SiO_2 + 2Al_2O_3 + 3MgO = SiO_2 + SiO_3Mg + Si_5O_{18}Al_4Mg_2$ (Quarz, Enstatit, Cordierit). Welche dieser Kombinationen realisiert wird, hängt bei der Gültigkeit der übrigen Bedingungen alsdann noch ab von dem Verhältnis Al_2O_3: MgO (Massenwirkung). Beim Ueberwiegen der Tonerde (1. Fall) entsteht neben dem Cordierit der Andalusit, beim Vorherrschen der Magnesia (2. Fall) dagegen der Enstatit. Die erstere Kombination ist denn auch für die kontaktliche Umwandlung der SiO_2-reichen Tongesteine naturgemäß die gewöhnlichere; doch wird nach den Mitteilungen von V. M. Goldschmidt auch die zweite im Gebiet von Christiania häufig angetroffen.

Aus dem angeführten Beispiel ist leicht ersichtlich, daß der resultierende Mineralbestand eines metamorphen Gesteins in erster Linie abhängt von der Konzentration, d. h. vom stofflichen Bestand des Ausgangsgesteins, und daß aus bestimmten Proportionen desselben gesetzmäßige paragenetische Mineralkombinationen hervorgehen. Aenderungen in der Konzentration haben entsprechende Aenderungen in der Paragenese zur Folge. Jeder Gesteinstypus ist eine paragenetische Mineralkombination.

Aenderungen in der Konzentration werden in erster Linie erzeugt durch Zufuhr von Lösungsmitteln, hauptsächlich Wasser, das verschiedene die Löslichkeit erhöhende Stoffe mitführen kann, besonders O, CO_2, Karbonate der Alkalien und Erdalkalien, sowie Alkalisilikate. Hier kommt vor allem die Bergfeuchtigkeit in Betracht, d. h. das in Rissen und Spältchen zirkulierende, von der Oberfläche stammende Wasser, das in Kapillaren und Subkapillaren stagnierend wird, aber auch chemisch gebundenes oder in fester Lösung sich befindliches Wasser (Konstitutions- und Kristallwasser), das bei der Mineralumwandlung frei und verfügbar werden kann. So treten z. B. beim Uebergang von Serpentin in Talk 8,3% Wasser aus. Nach den heutigen Erfahrungen ist es zweifellos, daß alle gesteinsbildenden Mineralien schon in reinem Wasser löslich sind und daß ihre Löslichkeit durch Druck- und Temperaturzunahme, sowie durch die vorhin erwähnten Beigaben des Wassers noch gesteigert wird. Aenderungen in der Konzentration können zur Uebersättigung der Lösungen und alsdann zur Mineralausscheidung führen.

2b) Temperatur. Van't Hoffsches Temperaturgesetz. Wärmetönung. Sammelkristallisation. Wärmequellen. Der Einfluß, den die Temperatur bei der Mineral- und Gesteinsumformung ausübt, ist durch das van't Hoffsche Prinzip vom équilibre mobile geregelt, welches aussagt, „daß bei konstant gehaltenem Volumen sich das Gleichgewicht eines chemischen Systems beim Erwärmen nach derjenigen Seite hin verschiebt, nach welcher die Reaktion unter Wärmeabsorption verläuft". Da nun jeder Uebergang eines Minerals in ein anderes, oder auch eines Gesteins in ein anderes, entweder unter Freiwerden oder unter Verbrauch von Wärme (+ oder — Wärmetönung) vor sich geht, so ergibt sich aus dem obigen Prinzip, daß hohe Temperaturen Mineralbildungen mit — Wärmetönung begünstigen werden, während umgekehrt bei niederen Temperaturen die Umwandlung mit + Wärmetönung, d. h. unter Freiwerden von Wärme vor sich gehen wird. Eine in der Natur häufig vorkommende Umwandlung ist z. B. die Entstehung von Serpentin aus Olivin und Enstatit nach der Gleichung:

$$\underset{\text{Enstatit}}{MgSiO_3} + \underset{\text{Olivin}}{Mg_2SiO_4} + \underset{\text{Wasser}}{2H_2O} =$$
$$\underset{\text{Serpentin.}}{H_4Mg_3Si_2O_9} + k$$

Der Vorgang involviert Freiwerden von Wärme.

Schmilzt man Serpentin, so kristallisieren aus der Schmelze Olivin und Enstatit aus, Wärme wird verbraucht und die obige Gleichung verläuft umgekehrt.

Analog ist die Bildung von Analcim aus Albit und ihre Reversion:

$$\underset{\text{Albit}}{2NaAlSi_3O_8} + \underset{\text{Wasser}}{H_2O} =$$
$$\underset{\text{Analcim}}{Na_2Al_2Si_4O_{12}.H_2O} + 2SiO_2 + k$$
$$\underset{\text{Analcim}}{Na_2Al_2Si_4O_{12}.H_2O} + 2SiO_2 =$$
$$\underset{\text{Albit}}{2NaAlSi_3O_8} + \underset{\text{Wasser}}{H_2O} - k$$

Van Hise hat für eine große Zahl von Mineralumwandlungen die Qualität der Wärmetönung mitgeteilt; zur vollkommenen Aufklärung solcher Vorgänge bedürfte es aber auch noch der Kenntnis ihrer Quantitäten.

Sind bei einer gegebenen Stoffkombination mehrere Mineralien oder Mineralkombinationen denkbar, so vollzieht sich bei den höchsten Temperaturen jene mit der größten — Wärmetönung und bei niedrigerer Temperatur ein Vorgang mit geringerem Wärmeverbrauch, während bei noch niedrigeren Wärmegraden ein ganz kleiner Wärmeverbrauch, ja sogar + Wärmetönung sich einstellen kann. Dem entsprechend bildet sich z. B. aus MgO und SiO_2 nach Beobachtungen in der Natur unter höchsten Temperaturen Olivin, bei mittleren Grünerit und in den tieferen Talk oder Serpentin, wobei naturgemäß die Grenzen dieser Vorgänge noch durch Konzentration und Druck verschiebbar sind.

Van't Hoff hat die allgemeine mathematische Formulierung der Gleichgewichtsverschiebung unter dem Einfluß der Temperaturänderung in folgender Fassung zum Ausdruck gebracht:

$$\ln K_1 - \ln K_2 = \frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)$$

K_1 und K_2 sind die Gleichgewichtskonstanten (resp. Konzentrationen) der beiden sich umwandelnden Mineralsysteme, R die Gaskonstante (rund 2 kal.), Q die Wärmetönung des Umwandlungsvorganges, T_1 u. T_2 die Ausgangs- und Endtemperatur in Graden der absoluten Skala. Aus dieser Formel ist ersichtlich, daß wir auch den Gleichgewichtszustand eines bei bekannter Temperaturverschiebung sich umwandelnden Minerals oder Gesteins genau zu fixieren vermöchten, wenn uns Q (die Wärmetönung) zahlenmäßig bekannt wäre, worüber leider noch alle Daten fehlen. Auch ist der Wert Q selber wieder eine Funktion der Temperatur und wechselt mit ihr; daher wird man sich noch auf lange hinaus für die Mineralbildung mit der qualitativen Benutzung des Gesetzes von van't Hoff begnügen müssen.

Andere Beziehungen, durch welche Temperaturerhöhungen die Gesteinsmetamorphose begünstigen, sind folgende:

Verringerung der Viskosität des Lösungsmittels, also Hebung seiner Beweglichkeit und seiner Fähigkeit, in die feinsten Zwischenräume einzudringen; Erhöhung der Löslichkeit der meisten Mineralien, weil ihre Auflösung unter Wärmeverbrauch vor sich geht; Begünstigung der Diffusion der gelösten Stoffe und daher auch des Stoffaustausches durch Temperaturwechsel; Beschleunigung der Umsetzungsvorgänge, da nach der kinetischen Theorie die Bewegungsenergie der Moleküle proportional der absoluten Temperatur wächst, aller Erfahrung nach aber die Reaktionsgeschwindigkeit mit der Temperatur noch viel rascher zunimmt, als es die Theorie erfordert (10 bis 12% per Grad); erhöhte Temperaturen fördern ferner die Umkristallisation und damit auch die Vergrößerung des Mineralkornes durch sogenannte Sammelkristallisation (Rinne). Dabei treten kleine Mineralkörner zu größeren zusammen, besonders dadurch, daß ein vorhandenes größeres Korn die kleineren anliegenden Körner aufzehrt, ein Vorgang, der aus der Praxis des chemischen Laboratoriums (Kochen der feinen Niederschläge vor dem Filtrieren) jedem bekannt ist. Solche Anlagerungen kommen aber auch ohne vorhergehende Lösung, also im trockenen Zustande, vor, denn es gelang F. Rinne, dichtem Kalkstein durch Erhitzen ein gröberes Korn zu geben, welcher Vorgang als Thermometamorphose bezeichnet wird.

Wärmequellen. Die Herkunft der für die Mineral- und Gesteinsmetamorphose in Betracht kommenden Wärme ist eine verschiedene; am bedeutsamsten ist wohl die innere Erdwärme, welche erdeinwärts bekanntlich für 100 m um 2 bis 4° zunimmt, so daß in einer Tiefe von 10 km bereits eine Wärme von ungefähr 300° besteht. Gesteine können durch Senkungen, Ueberschiebungen oder Ueberdeckungen in größere Tiefen und damit in höhere Temperaturen versetzt werden, während umgekehrt Hebungen oder Abtragungen sie in kühlere Zonen bringen, was Anstoß zu Gleichgewichtsstörungen geben kann. Als weitere Wärmequellen gelten vulkanische Intrusionen, die Reibungswärme bei Dislokationen, und die die Metamorphose begleitenden chemischen Prozesse selbst. Neuerdings ist auch mehrfach auf radioaktive Vorgänge als Wärmequelle hingewiesen worden.

2c) Druck. Gesetz von Le Chatelier. Volumgesetz. Druckgleichung für den Umwandlungspunkt. Volumenänderungen. Die Wirkung des Druckes auf die Mineralbildung in der Gesteinsmetamorphose wird durch das Gesetz von Le Chatelier beherrscht, welches lautet: „Komprimiert man ein chemisches System bei konstant gehaltener Temperatur, so findet eine Verschiebung des Gleichgewichtes nach jener Seite hin statt, nach welcher die Reaktion mit einer Verminderung des Volumens verknüpft ist.“ Danach begünstigt also Druck jene Vorgänge, bei welchen Mineralien mit dem geringsten Molekularvolumen (oder dem größten spezif. Gewicht) entstehen. Diese Beziehung ist unabhängig von der Formulierung durch Le Chatelier unter dem Namen des Volumgesetzes aus der Erfahrung abgeleitet und zuerst von R. Lepsius ausgesprochen worden. Man hatte bemerkt, daß von den heteromorphen Formen einer

Substanz unter Druck stets die spezifisch schwerste sich bildet, z. B. für TiO_2 immer der Rutil, für SiO_5Al_2 immer der Disthen. Auch alle anderen Gesteinskomponenten streben bei der Metamorphose unter Druck jenen Formen zu, welche den kleinsten Raum einnehmen, ein Moment, welches solchen metamorphen Gesteinen ein ganz charakteristisches Gepräge verleiht. Folgende 4 Gleichungen mögen als Beispiele solcher Umwandlungen dienen, unter Angabe der obwaltenden Molekularvolumina:

Olivin + Anorthit		gibt Granat.	
Mg_2SiO_4 . . .	43,9	$Mg_2CaAl_2Si_3O_{12}$.	121,0
$CaAl_2Si_2O_8$ . .	191,1		
	145,0		

Nephelin + Albit		gibt Jadëit.	
$NaAlSiO_4$ . .	59,0	$2NaAlSi_2O_6$ . .	122,8
$NaAlSi_3O_8$ . .	199,3		
	159,3		

Aplit (kaolinisiert) geht über in Muskovitschiefer.

(Orthoklas, Kaolin, Quarz)		(Muskovit, Quarz)	
$4KAlSi_3O_8$ . .	437,6	$2HK_2Al_2Si_3O_{12}$.	289,0
$H_4Al_2Si_2O_9$ . .	107,9	H_2O	16,0
$2SiO_2$	45,6	$6SiO_2$	136,8
	591,1		432,8

Diabas kann übergehen in Amphibolit.

(Labrador, Augit, Titaneisen)		(Saurer Plagioklas, Hornblende, Granat, Titanit, Quarz)	
$3CaAl_2Si_2O_8$.	393,3	$NaAlSi_3O_8$ . .	199,3
$NaAlSi_3O_8$ . .	199,3	$Mg_3CaSi_4O_{12}$.	135,0
$3MgCaSi_2O_6$.	204,0	$2FeAl_2SiO_6$ . .	140,5
$2FeTiO_3$ . . .	63,4	$Ca_3Al_2Si_3O_{12}$.	125,8
	671,0	$2CaTiSiO_5$ . . .	111,2
		SiO_2	22,8
			635,6

Von F. Loewinson-Lessing wurde zuerst die Wahrnehmung gemacht, daß die gesteinsbildenden Mineralien sich in zwei Gruppen unterbringen lassen, in deren einer das beobachtete Molekularvolumen der ganzen Verbindung kleiner ist, als die Summe der Molekularvolumen der sie zusammensetzenden Oxyde, in der anderen umgekehrt. Die Substanzen der 1. Gruppe wurden als —, die der 2. als + bezeichnet. Die nachfolgende Tabelle gibt eine bezügliche kleine Zusammenstellung und zeigt zugleich, daß in den unter Druck entstandenen metamorphen Gesteinen die — Komponenten die häufigsten sind.

Name	Formel	Spezifisches Gewicht	Molekulargewicht	Molekularvolumen		Zeichen
				beobachtet	berechnet	
Pyrit	FeS_2	5,05	120,12	23	—	+
Magnetkies	Fe_nS_{n+1}	4,60	88,06	19,1	—	+
Quarz	SiO_2	2,65	60,40	22,8	—	
Rutil	TiO_2	4,20	80,10	19,1	—	
Magnetit	Fe_3O_4	5,18	232,00	44,8	—	
Spinell	Al_2O_4Mg	3,52	142,56	40,6	36,5	+
Calcit	$CaCO_3$	2,72	100,00	36,8	73,2	—
Siderit	$FeCO_3$	3,80	116,00	29,5	70,5	—
Forsterit	Mg_2SiO_4	3,24	142,60	43,9	45,4	—
Wollastonit	$CaSiO_3$	3,80	116,40	41,5	40,0	+
Diopsid	$CaMgSi_2O_6$	3,20	218,00	68,0	74,1	—
Jadëit	$NaAlSi_2O_6$	3,30	205,00	61,4	69,2	—
Tremolit	$CaMg_3Si_4O_{12}$	3,03	409,50	135,0	142,3	—
Glaukophan	$Na_2Al_2Si_4O_{12}$	3,10	461,60	136,4	143,6	—
Orthoklas	$KAlSi_3O_8$	2,57	277,30	109,4	98,7	+
Albit	$NaAlSi_3O_8$	2,62	263,30	100,3	92,0	+
Anorthit	$CaAl_2Si_2O_8$	2,75	278,00	101,1	88,0	+
Andalusit	Al_2SiO_5	3,16	163,00	51,8	48,0	+
Sillimanit	,,	3,24	163,00	50,2	48,0	+
Disthen	,,	3,66	163,00	44,4	48,0	—
Cordierit	$Mg_2Al_4Si_5O_{18}$	2,60	602,30	233,0	187,0	+
Pyrop	$Mg_3Al_2Si_3O_{12}$	3,76	443,80	118,0	127,5	—
Almandin	$Fe_3Al_2Si_3O_{12}$	4,11	492,10	119,8	137,1	—
Zoisit.	$HCa_2Al_3Si_3O_{13}$	3,40	457,60	137,0	149,6	—
Epidot	$HCa_2(Al,Fe)_3Si_3O_{13}$	3,50	505,40	148,0	—	
Antigorit	$H_4Mg_3Si_2O_9$	2,60	285,20	109,0	115,5	—
Talk	$H_2Mg_3Si_4O_{12}$	2,70	383,00	142,4	143,1	—
Chloritoid	$H_2FeAl_2SiO_7$	3,50	246,40	69,6	80,5	—
Muscovit	$H_2KAl_3Si_3O_{12}$	2,83	396,90	140,0	142,0	—
Biotit	$(K,H)_3Mg_6Al_3Si_6O_{24}$	3,06	468,30	152,2	—	
Titanit	$CaSiTiO_5$	3,50	196,70	56,6	59,1	—

Die Bedeutung des Druckes für die Existenzfelder der Mineralien wird am besten aus der Gleichung ersichtlich, welche die Verschiebung des Umwandlungspunktes (und Schmelzpunktes) unter seinen Einfluß stellt und lautet:

$$\frac{dT}{dP} = \frac{T(v-v_1)}{W}$$

worin dT die Veränderung der Umwandlungstemperatur, dP die Druckänderung, $(v-v_1)$ die Volumenänderung bei der Umwandlung (resp. Schmelzung), T die Umwandlungstemperatur in Graden der absoluten Skala und W die Umwandlungswärme (resp. Schmelzwärme) bedeutet. Aus dieser Formel ist ersichtlich, daß die Verschiebung des Umwandlungspunktes direkt abhängig ist von der bei der Umwandlung erfolgenden Volumenänderung $(v-v_1)$, welche beim Uebergang einer festen Substanz in eine andere feste relativ bedeutend ist, so daß sich ohne weiteres eine stärkere Verschiebung jenes Punktes unter Druck ergibt, die hier jedenfalls beträchtlicher ist, als die Aenderung des Schmelzpunktes unter Pression, da die Volumina von flüssig und fest bei Silikaten wenig differieren. Aus diesem Grunde erscheint denn auch die Wirkung des Druckes in der Metamorphose stärker, als in der Mineralbildung aus Schmelzlösung, was gelegentlich zu wenig berücksichtigt worden ist.

Sie läßt sich leicht bemessen an dem einfachen Beispiel der Enantiotropie Tridymit-Quarz, deren spezifische Volumina zwar nicht bekannt sind, aber entsprechend den großen Differenzen der spezifischen Gewichte (2,31 und 2,65) relativ groß sein müssen. Da nun die Umwandlungswärme W polymorpher anorganischer Körper von einfacher Zusammensetzung nach den in Landolt-Börnsteins Tabellen mitgeteilten Zahlen sehr klein ist, so erhält in unserem Falle $\frac{dT}{dP}$ einen hohen Wert, d. h. die Verschiebung des Umwandlungspunktes Tridymit-Quarz durch Druck nach oben muß eine sehr beträchtliche sein und damit vergrößert sich das Existenzfeld des Quarzes wahrscheinlich so sehr, daß er unter hohen Drucken noch in den höchsten Temperaturen sich ausbilden kann, unter völliger Uebergehung des bei 800° stabilen Tridymites. Dem entsprechend kann denn auch Quarz aus den Magmen in der Tiefe der Erdrinde direkt auskristallisieren und große Kristalle bilden, wodurch sich z. B. das Auftreten von Quarzen in Graniten und Granitporphyren erklärt. Unter den Gemengteilen metamorpher Gesteine gilt Quarz als „Durchläufer", d. h. als ein Mineral, das unter den verschiedensten Bedingungen des Druckes und der Temperatur bestandfähig ist.

Der Amerikaner van Hise hat für ungefähr 300 verschiedene Umwandlungsvorgänge die Volumenänderungen festgestellt und dargetan, daß dieselben bis 30% und mehr gegenüber dem Volumen der Ausgangskörper betragen können, daher im allgemeinen viel beträchtlicher sind, als man annimmt. Es geht daraus auch hervor, daß es für das Verständnis der Erscheinungen der Gesteinsmetamorphose höchst wichtig ist, neben der Wärmetönung und der Umwandlungstemperatur jedes Umwandlungsvorganges, wenn irgend möglich, auch die exakte Größe der Volumenänderung festzustellen.

Da wohl die meisten Substanzen unter Volumenkontraktion sich lösen, wird Drucksteigerung auch die Löslichkeit der gesteinsbildenden Komponenten erhöhen; immerhin scheint dies für reines Wasser nicht in hohem Maße der Fall zu sein, mehr dagegen, wenn Gase, z. B. CO_2 im Lösungsmittel vorhanden sind. So ist durch Versuche festgestellt, daß von $MgCO_3$ sich in kohlensäurehaltigem Wasser bei gewöhnlichem Drucke 25,79 g, bei 9 Atmosphären dagegen 56,59 g zu lösen vermögen.

2d) Arten des Druckes. Der auf ein Mineral oder ein Gestein ausgeübte Druck kann entweder von allen Seiten gleichmäßig einwirken (statischer Druck), oder ausschließlich in einer oder einigen Richtungen sich geltend machen (gerichteter Druck, Streß, auch Pressung).

α) Allseitiger Druck. Innerhalb der Erdrinde unterliegt jedes Gestein dem Druck des Ueberlastenden, der selbstverständlich ein statischer Druck ist, weil keine Möglichkeit des Ausweichens vorhanden ist. Da das mittlere spezifische Gewicht der Gesteine 2,6 bis 2,8, so beträgt dieser Druck in 1 m Tiefe auf den qcm 260 bis 280 g, in 100 m Tiefe 26 bis 28 kg, in 1 km Tiefe 260 bis 280 kg, in 20 km schon 5200 bis 5600 kg. Durch Eindeckung oder durch tektonische Verschiebungen (vermöge von Senkungen oder Hebungen) können Gesteine ganz bedeutenden Druckänderungen unterworfen werden, durch welche nach dem Vorausgegangenen die Stabilitätsfelder ihrer Komponenten sich stark verschieben und daher sich Aenderungen in der Gesteinszusammensetzung ergeben dürften.

β) Gerichteter Druck (Streß). Prinzip von Riecke. Wenn in ungleichen Richtungen verschiedene Widerstände zu überwinden sind, entsteht gerichteter Druck und kann man sich diesen zerlegt denken in drei aufeinander senkrecht stehende Komponenten. Dieselben stellen dann als Richtungen des größten, mittleren und geringsten Druckes die 3 Achsen eines Ellipsoides dar, und sind in ihrem Werte abhängig von der Größe des zu überwindenden Widerstandes. — Dabei ergibt sich in Grenzfällen die Möglichkeit, daß der mittlere Widerstand gleich werden kann dem größten oder dem kleinsten, oder daß er sogar in

allen Richtungen gleich wird, was dann den Bedingungen des statischen Druckes entspricht. Solcher Streß ruft nun in den ihm unterliegenden Körpern einen gewissen Spannungszustand („Strain") hervor, welcher beruht auf kleinsten Verschiebungen der einzelnen Teilchen des betroffenen Körpers, entweder nur in der Lage, oder auch in der Form. Die Folge solchen Strains ist eine wesentliche Steigerung des Energieinhaltes der ihm ausgesetzten Gesteine womit sich z. B. eine Mehrung der Löslichkeit und eine Erhöhung der Reaktionsfähigkeit verknüpft, so daß Umwandlungsvorgänge (Umkristallisation und Ummineralisation) dadurch unterstützt und beschleunigt werden. Diese Vorgänge unterliegen in der Ausführung naturgemäß den Forderungen des gerichteten Druckes, was insbesondere in einer gewissen Formentwickelung zum Ausdruck kommt, indem in den Neubildungen abgeplattete oder faserige Formen bevorzugt werden. Lamellare Mineralien, wie die Glimmer, die Chlorite und der Talk bilden dann ihre Blätter annähernd senkrecht zur Richtung des größten Stresses und tunlichst parallel zueinander aus, während faserige Komponenten, wie Hornblende, Disthen und Sillimanit, ihre prismatischen Formen ungefähr gleichgerichtet entwickeln. Körnige Gemengteile, wie z. B. die Feldspäte und der Quarz, nehmen mehr oder weniger ausgeprägt linsenförmige Gestalten an und bilden dabei den größten Durchmesser derselben ebenfalls möglichst in der gleichen Richtung und senkrecht zum Streß aus.

Schon diese Betrachtungen dürften genügen, die eigenartige Formentwickelung und die Lage der Mineralien in Gesteinen verständlich zu machen, deren Metamorphose unter gerichtetem Druck (z. B. unter Dislokationen bei Seitenschub) stattfindet. Zur Erklärung dieser Erscheinungen wurde aber, besonders von F. Becke, noch eine weitere physikalische Beziehung, das Prinzip von Riecke, herbeigezogen.

Nach ihm wird der Schmelzpunkt eines Körpers in seiner gesättigten Lösung durch mechanische Einwirkungen jeder Art, sei es Druck oder Zug, dann herabgesetzt, wenn nur der feste Körper, nicht aber seine Lösung, jenem unterworfen ist. In solchen Fällen muß also ein Teil des betreffenden Körpers gelöst werden, wodurch sich seine Lösung übersättigt. Sie wird alsdann an einer anderen Stelle, welche keinen oder geringeren deformierenden Kräften ausgesetzt ist, Substanz wieder abscheiden. Dies läßt sich in einfacher Weise auf die Gesteinsmetamorphose übertragen. In den feinsten Klüften zwischen den Gemengteilen existieren ihre gesättigten Lösungen. An Stellen größten Druckes, also annähernd in der Richtung des maximalen Stresses, gehen die Gesteinskomponenten teilweise in Lösung und werden an Stellen des schwächsten Druckes, d. h. senkrecht zu jener Richtung, wieder abgesetzt, wobei schon vorhandene Mineralien keimartig wirken und die Auskristallisation befördern mögen. Durch Summierung solcher minimaler Stoffverschiebungen unter Anpassung an gerichteten Druck kommen bruchlose Umformungen zustande, die den Eindruck erwecken können, als ob das ganze Gestein plastisch wäre. Erleiden z. B. säulige Aggregate von Biotitblättchen, wie sie in manchen Erstarrungsgesteinen zu Hause sind, in der Richtung der Prismenkanten einseitigen Druck, so wird an der Grund- und Deckfläche der Säulchen Substanz weggelöst und in der Richtung senkrecht zu den Kanten, wo der geringste Druck herrscht, wieder abgesetzt. So verflachen die Säulchen allmählich sich zu Linsen, Flanschen und schließlich zu breiten Blättern. Oft sind solche Flächen stärksten Wachstums zugleich durch die Kristallstruktur bevorzugte Flächen, z. B. Spaltflächen. Kalksteine und Quarzite erreichen denn auch unter Streß niemals denselben hohen Grad lamellaren Baues, wie Glimmerschiefer, Chloritschiefer.

2e) Plastizität der Gesteine und bruchlose Umformung. Kataklase. Manche Forscher nehmen an, daß die bruchlose Umformung von Gesteinen unter gerichtetem Druck auch ohne Lösungsmittel sich vollziehe. A. Heim hatte zuerst den Gedanken ausgesprochen, daß unter einem statischen Druck, der die rückwirkende Festigkeit eines Gesteins übersteigt, dasselbe in einen latent plastischen Zustand versetzt werde. Kommt ein solches Gestein alsdann in den Wirkungsbereich von gerichtetem oder Seitendruck, so verwandelt sich die latente Plastizität in aktive und vermag sich das Gestein dem Streß ohne Brüche (etwa wie Wachs) anzupassen. Heim suchte seine viel umstrittene Ansicht durch zahlreiche Beobachtungen im dislozierten Gebirge zu stützen und bald war man auch bestrebt, auf experimentellem Wege Klarheit über das Problem zu gewinnen. Heute darf es wohl als prinzipiell gelöst gelten, wobei aber hinzugefügt werden muß, daß die maßgebenden Versuche zunächst bei einzelnen Mineralien (mit Gleitflächen), oder monomineralischen Gesteinen, hauptsächlich Kalksteinen, einsetzten und daß solche über polymineralische Gesteine noch fast ganz fehlen. Es scheint jetzt festzustehen, daß die Plastizität (= reziproke innere Reibung) eine allen festen Körpern zukommende quantitative Eigenschaft ist und daß es keinen definierten Umwandlungspunkt starr-plastisch gibt, sondern nur kontinuierliche Uebergänge. Starr und plastisch sind vielmehr Grenzfälle, denen sich die Körper immer nur mehr oder weniger nähern. Druck vermag die Plastizität der festen Körper zu erhöhen; dies ging besonders aus den Experimenten von G. Tammann über die Ausflußgeschwindigkeit fester Körper hervor. Ihr Maß ist die Sub-

stanzmenge, welche unter bekannten Drucken und Temperaturen durch eine Oeffnung von gegebenem Durchmesser in der Zeiteinheit zum Abfließen gebracht wird; für Eis wurde zum Beispiel festgestellt, daß eine Druckzunahme von 100 kg die Ausflußgeschwindigkeit verdoppelt. Plastische Deformationen unter Druck sind für eine große Anzahl von Mineralien nachgewiesen, wobei es sich zeigte, daß die reziproke innere Reibung der einzelnen Spezies sehr verschieden ist, daß demnach in einem polymineralischen Gestein ein Teil der Komponenten dem gegebenen Druck durch bruchlose Umformung nachgeben kann, ein anderer durch Zertrümmerung.

Biegsamkeit verbunden mit bleibender Deformation wurde festgestellt für Kristalle von Graphit, Antimonglanz, Bleiglanz, Flußspat, Gips, Apatit, Disthen, Glimmer, rhombischen und monoklinen Augit u. a. An Quarz wurde von W. Salomon eine Biegsamkeit von 57° ohne Bruch beobachtet. Nach F. D. Adams verhielten sich bei den von ihm angewandten Drucken alle Mineralien plastisch, deren Härte den 5. Grad der Mohsschen Skala nicht überstieg und zwar um so mehr, je weicher sie waren. Demselben Forscher gelang es auch, allein durch Druck Marmor plastisch zu deformieren.

Sicherlich kann es keinem Zweifel unterliegen, daß langsame Einwirkungen von Druck plastische Deformationen unterstützen, rasche dagegen unter Zertrümmerung sich auslösen. Noch bedeutender als der Einfluß des Druckes auf die Plastizität der Körper ist derjenige der Temperatur. Aus den Experimenten von G. Tammann geht hervor, daß für eine große Zahl von Metallen sich die Ausflußgeschwindigkeit verdoppelt, wenn die Temperatur um 10° erhöht wird. Je mehr man sich dem Schmelzpunkt eines Körpers nähert, um so größer wird seine Plastizität; demnach können Substanzen, die weit unter ihrem Schmelzpunkt durch Bruch deformiert werden, mit Annäherung an denselben sich bruchlos umformen. Nach alledem kann wohl als feststehend gelten, daß der plastischen Deformation in der Gesteinsmetamorphose eine gewisse Rolle zukommt; nur sind leider Ausdehnung und Grenze derselben noch sehr wenig durch die Beobachtung festgestellt, weil dies mit großen Schwierigkeiten verknüpft ist. Ueber die Reaktionsfähigkeit solcher unter Druck plastisch gewordener Körper, d. h. über ihre Tendenz oder besondere Fähigkeit zur Ummineralisierung, ist noch nichts bekannt.

Wird ein unter nicht allzu großer Belastung liegendes Gestein von gerichtetem Druck getroffen, oder wirkt solcher sehr rasch ein, so erfolgt die Anpassung meist durch mechanische Zertrümmerung (Kataklase). Je nach dem schwächeren oder stärkeren Grade äußert sie sich in undulöser Auslöschung der Komponenten oder dieselben sind in einzelne Stücke zerbrochen oder mit einem feinen Zerreibsel ihrer Substanz, dem sogenannten Mörtelkranz, umgeben. Oft wird auch der ganze Mineralbestand zertrümmert und zu linsen- oder lagenförmigen Aggregaten ausgezogen. Naturgemäß neigen so zertrümmerte Gesteine sehr zu chemischer Umwandlung, denn durch die Zertrümmerung werden für umwandelnde Agentien nicht nur vermehrte Zugänge geschaffen, sondern es wird auch ihre Angriffsfläche vergrößert. Geht die Zerkleinerung eines kugeligen Kornes auf z. B. $^1/_{10}$ des bisherigen Radius, so reduziert sich damit sein Volumen auf $^1/_{1000}$ und die Gesamtoberfläche aller Teilkörner beträgt das 10fache gegenüber dem unzertrümmerten Korn.

2f) Individuelle Faktoren. Chemismus des Ausgangsmaterials und Korngröße seiner Komponenten. Außer durch Konzentration, Temperatur und Druck wird der Gang der Metamorphose im besonderen naturgemäß bedingt durch die spezielle Art der chemischen Substanz der Ausgangssteine, resp. ihrer Komponenten. Granitische Gesteine z. B. ändern bei der Erstrebung eines neuen Gleichgewichtszustandes ihren Mineralbestand im ganzen sehr wenig, denn die aus ihnen entstehenden Gneise führen eben wieder Quarz, Orthoklas und Glimmer. Dagegen bieten gabbroide, wie überhaupt basische Gesteine eine viel größere Zahl von Umwandlungsmöglichkeiten. Aus einem Diabas können Eklogite, verschiedene Amphibolite, Epidot-, Chlorit- und Glaukophangesteine hervorgehen. Dies hängt nicht bloß mit dem reicheren Inhalt des Ausgangsgesteins, sondern auch mit der im ganzen geringeren Stabilität der einzelnen Komponenten zusammen, da die Plagioklase, Olivine, Augite und Hornblenden, die Biotite und Chlorite aller Beobachtung nach leicht der Metamorphose anheimfallen. Einen sichtlichen Einfluß übt endlich auch noch die Korngröße der Gesteine auf den Gang der Umwandlung aus. Gleichmäßig feinkörnige Gesteine werden naturgemäß leichter und rascher einen neuen Gleichgewichtszustand erreichen, als grobkörnige. Große Körner können gelegentlich auch nur teilweise an den Umsetzungen sich betätigen und dann kann es vorkommen, daß Mineralformen nebeneinander bestehen bleiben, die nach der Phasenregel sich ausschließen sollten. So beobachtet man häufig, daß von grobkörnigen Sandsteinen scharfkantige Quarzkörner erhalten bleiben, während das feinkörnige Bindemittel vollständig umgewandelt ist. Daß endlich auch einige physikalische Eigenschaften der Komponenten, wie Sprödigkeit, Härte, Spaltbarkeit, Gleit-

fähigkeit, Neigung zu Zwillingsbildung, für die Umbildungsfähigkeit von Einfluß sind, sei nur nebenbei noch bemerkt.

3. Arten der Metamorphose und ihre Produkte. Eine Aufgabe der Zukunft wird es sein, an der Hand der bekannten Faktoren der Metamorphose die Existenzfelder der verschiedenen Mineralien zu bestimmen und alsdann durch Beobachtung und Experiment diejenigen Mineralassoziationen aufzusuchen, welche nach der Phasenregel als paragenetische Kombinationen gelten können. Durch solche werden aber die metamorphen Gesteine qualitativ und quantitativ bestimmt und dürften sich in paragenetischen Diagrammen untereinander verknüpfen lassen, ähnlich wie dies van 't Hoff für die ozeanischen Salzablagerungen gelungen ist; mit ihnen wird auch die Grundlage einer rein genetischen Systematik der metamorphen Gesteine gewonnen sein. Einstweilen wird man sich aber noch mit einer qualitativen Anwendung der im vorstehenden entwickelten Faktoren und Gesetze begnügen müssen und kann an ihrer Hand zu nachfolgender Uebersicht der metamorphen Gesteine gelangen.

3a) Vorwiegend mechanisch wirkender Streß. Kataklastische Umformung. Unter der mechanischen Einwirkung von raschem starkem Streß entstehen die kataklastisch umgeformten Gesteine. Ihre Mineralien erfahren vorwiegend mechanische Veränderungen der Form und Lage (Zertrümmerung und Verschiebung); doch fehlen Anfänge von chemischer Umwandlung wohl nie. Grobkörnige saure und intermediäre Erstarrungsgesteine können so in Granit-, Syenit- und Tonalitgneise übergehen; von den Sedimenten werden Quarzite und grobe Psammite gerne rein kataklastisch umgeformt, während in Konglomeraten die Gerölle zerdrückt, das Bindemittel aber chemisch umgewandelt erscheinen kann.

3b) Kombinierte Wirkung von Druck und Temperatur. Kristalline Schiefer im engeren Sinne. Zonenlehre. Schwierigkeiten in der Abgrenzung. Diagenese. Kombinierte Wirkung von Druck und Temperatur führt zu den kristallinen Schiefern im engeren Sinn. Da Temperatur und Druck mit der Tiefe im allgemeinen zunehmen, ist man dazu gelangt, innerhalb der Erdrinde für den Gang der Metamorphose drei (resp. zwei nach Becke, v. Hise) Zonen als physikalische Niveaux zu unterscheiden, die sich je durch einen besonderen Mineral- und Gesteinscharakter kennzeichnen lassen.

α) In der obersten Zone (äußere Partien der Erdrinde) sind bei dem dort vorherrschenden Streß und der nur mäßig hohen Temperatur besonders wasser- und OH-haltige Mineralien, wie Sericit, Chlorite, Sprödglimmer, Talk, Serpentin, Zoisit und Epidot beständig neben gewissen Granaten, Glaukophan und den Durchläufern Quarz und Albit. Der Zutritt von CO_2 ermöglicht die Bildung von Karbonaten, derjenige von O und Wasser die höheren Oxydationsstufen des Eisens. So entstehen als Gesteine die mannigfachen Formen der Albitgneise, die Chlorit-, Epidot-, Talk- und Serpentinschiefer, Glaukophan führenden Schiefer, die eigentlichen Phyllite und Kalkphyllite.

β) In der mittleren Zone erfahren Temperatur und Druck eine wesentliche Steigerung; wasserhaltige Komponenten werden daher durch wasserfreie ersetzt, können aber z. T. auch noch nebeneinander fortbestehen, so Zoisit und Epidot neben Plagioklas, Muscovit neben Orthoklas. Unter dem Regime des herrschenden Stresses dominieren die — Mineralien: verschiedene Glimmer und Hornblenden, Staurolith, Disthen, daneben unter den Eisenerzen eher Magnetit als Hämatit. Als besondern typische Gesteine figurieren die Ein- und Zweiglimmergneise mit Orthoklas- und Plagioklasführung, die vielfachen Formen der Glimmerschiefer und Amphibolite, die Strahlsteinschiefer und Nephritite.

γ) In der tiefsten Zone mit den höchsten Temperaturen und annähernd allseitigem Drucke fehlen die OH-haltigen Komponenten mit wenigen Ausnahmen (Biotit) ganz, Olivin und Augite treten auf, die Feldspäte erreichen nach Art und Menge ihre höchste Bedeutung und neben ihnen die weiteren + Mineralien Spinell, Pyrop, Sillimanit und Cordierit. Der Mineralbestand ähnelt stark dem der Erstarrungsgesteine. Als charakteristische Gesteine dieser Zone gelten die Biotitorthoklas- und Augitplagioklasgneise, Sillimanit- und Cordieritgneise, Eklogite, Olivin- und Augitschiefer, Granatfelse.

Die Erscheinungsformen der obersten und mittleren Zone werden zusammen mit denen der Kataklase gelegentlich der sogenannten Dynamometamorphose zugeschrieben, während solche der tiefsten Zone in der Regionalmetamorphose untergebracht werden.

Die Abgrenzung der physikalischen Zonen gegeneinander ist natürlich keine scharfe und kann auch nicht immer mit der von geologischen Niveaux zusammenfallen. Es können z. B. geothermische Tiefenstufen der Erdrinde durch vulkanische Intrusionen eine starke Verschiebung erfahren, ebenso die Intensität und Art der Druckwirkung durch tektonische Störungen und Stauungen lokal stark modifiziert, d. h. vergrößert oder verkleinert werden. Auch die ungleiche Ausdehnung der Existenzbereiche und die verschieden schnelle Anpassungsfähigkeit der einzelnen Komponenten an wechselnde Temperaturen und Drucke erschweren eine reinliche Scheidung. Wenn z. B. Produkte der Tiefe relativ rasch in höhere Niveaux versetzt werden, kann sich der typische Mineralbestand dabei auch nur z. T. verwischen. So trifft

man etwa Gneise an, die Feldspat führen, welcher nach Form und Chemismus der Tiefe angehört, in denen aber andererseits der ursprünglich vorhandene Biotit bereits durch Chlorit ersetzt werden konnte („Diaphtoritische Gesteine" nach F. Becke).

Da die Metamorphose ein allmählicher Vorgang ist, bestehen etwelche Unsicherheiten in der Abgrenzung gegenüber den Ausgangsgesteinen, so für die Erstarrungsgesteine namentlich in der tiefsten Zone, für die Sedimente besonders dadurch, daß bei ihnen die Prozesse der Verfestigung, die sogenannte Diagenese und diejenigen der Metamorphose unmittelbar ineinander greifen und auch manche Aehnlichkeiten untereinander aufweisen. Es sei hier für polymorphe Substanzen nur erinnert an die Ueberführung der labileren Formen in stabilere (z. B. bei $CaCO_3$ des Vaterit in Aragonit und Calcit), an die Kornvergröberung durch Sammelkristallisation, die Entglasung von Glaspartikeln, die Kristallisation von Gelen und an die Gesteinserhärtung durch Ausfüllung von Hohlräumen (Verkittung von Sanden durch $CaCO_3$); auch hierbei kommen oft Stoffwanderungen im Festen in Betracht. Immerhin kann gesagt werden, daß die Diagenese das werdende, die Metamorphose dagegen das fertige Gestein trifft. Endlich machte bisher auch die Abgrenzung von Metamorphose und Verwitterung einige Schwierigkeiten. Jetzt weiß man, daß die Oberflächenverwitterung wesentlich besteht in einem Uebergang von kristalloiden Substanzen in kolloide Gele, verbunden mit Neubildung einiger leicht löslicher Kristalloide, während durch die Prozesse der Metamorphose neue kristallisierte Körper entstehen; darnach würde die Bildung von Serpentin und Talk auch letzteren zufallen.

3c) Vorherrschaft der Temperaturwirkung erzeugt durch vulkanische Intrusion. Kontaktmetamorphose. Gewöhnlicher und pneumatolytischer Kontakt. Injektionsmetamorphose. Einschmelzmetamorphose. Beschränkt sich der Einfluß einer intrusiven Masse auf bloße Hitzewirkung, so ergeben sich die Erscheinungen der gewöhnlichen Kontaktmetamorphose. Da die Intensität der Temperaturwirkung innerhalb des Kontakthofes nach außen mehr und mehr abnimmt, können innerhalb desselben wiederum Zonen angenommen werden. Auch V. M. Goldschmidt kam in seiner Untersuchung der Kontaktgesteine des Christianiagebietes dazu, einen inneren und äußeren Kontakthof zu unterscheiden und es gelang ihm, aus verschiedenen Ausgangsgesteinen unter Anwendung der Phasenregel und des Massenwirkungsgesetzes besonders für die innere Zone in Uebereinstimmung mit den natürlichen Vorkommnissen eine Reihe typischer Mineralkombinationen abzuleiten. Für die Kontaktmetamorphose eines normalen kalkfreien Tongesteins ergab sich als neuer Mineralbestand Andalusit, Cordierit, Quarz, Biotit und Albit (neben etwas Orthoklas und Magnetit); ist auch spärlicher Kalk vorhanden, so kann sich auf Kosten des Andalusites der Anorthit bilden, bis zur völligen Verdrängung desselben. Bei vermehrtem Kalk wird Cordierit ebenfalls unmöglich, indem Anorthit noch weiter zunimmt und daneben Enstatit entsteht, so daß nun die Mineralassoziation aus Quarz, Enstatit, Plagioklas und Biotit (neben Orthoklas und Magnetit) besteht. Ein noch größerer Kalkgehalt führt zur Bildung von Wollastonit und unter Verschwinden des Enstatit zu Diopsid (bei stärkerer Pression zu Hornblende), und ermöglicht im maximalen Vorkommen von Kalk die Entstehung von Grossular (Kalktongranat) unter gleichzeitigem Wegfall von Biotit. Kalksteine können im Kontakt innerhalb von körnigem Karbonat (Marmor) neben Grossular auch noch Vesuvian, Epidot, Skapolith, Grammatit und andere Kalksilikate zur Ausbildung bringen, während in dolomitischen Kalken die Kontaktmetamorphose das $MgCO_3$ in Olivine oder Spinelle überführt. Sind die Kontaktwirkungen gleichzeitig mit gerichtetem Druck kombiniert („Piëzo-Kontaktmetamorphose" von E. Weinschenk), so tritt überall auch hier das Volumgesetz in Kraft und der entstehende Mineralbestand gleicht demjenigen der kristallinen Schiefer.

Viele Kontaktgesteine enthalten alle Arten Turmaline, Topas, Axinit, Fluorit, Apatit, Mineralien, die der Zufuhr und Mitwirkung von vulkanischen Gasen und Dämpfen (Fluoride und Chloride von Leicht- und Schwermetallen) zugeschrieben werden. Ein reichlicheres Auftreten derselben führt zu den Gesteinen des pneumatolytischen Kontaktes. Tongesteine gehen unter seinem Einfluß am häufigsten in Turmalin- und Topasfelse über; wesentlich verbreiteter scheinen aber die pneumatolytisch verwandelten Kalksteine zu sein. Als Erklärung hierfür wird von V. M. Goldschmidt angenommen, daß durch den Kalkstein eine Art selektiver Absorption ausgeübt wird, indem er aus den an ihm vorbeistreichenden Gasen gewisse Stoffe, z. B. Halogenide des Eisens und Siliciums anzieht und sie bindet als Eisenoxyd, Eisensilikat und Flußspat. Metalloxyde können hierbei so weit angereichert werden, daß sie einen Abbau lohnen. Die solche Erzlager begleitenden Kalkeisensilikatmassen, besonders Hedenbergit und Andradit (ein Kalkeisengranat), bilden dann den sogenannten Skarn (Unrat). Auch in diesem Falle machen sich wieder Massenwirkungen geltend. Ist bei der Stoffzufuhr das Verhältnis von SiO_2: Fe_2O_3 größer als 3 : 1, so entsteht ein Andradit-Wollastonithornfels, ist es

aber kleiner, d. h. tritt weniger SiO_2 auf, so muß neben Andradit noch Eisenoxyd übrig bleiben. In ähnlicher Weise variiert die Bildung der Hedenbergithornfelse. — Verbinden sich mit der Kontaktwirkung noch die Zufuhr von insbesondere aplitisch-pegmatitischen Massen, so entstehen als Produkte der Injektionsmetamorphose die sogenannten Injektionsgesteine, in denen die erwähnten Substanzen in Gestalt von helleren Lagen, Nestern, Gängen, Adern, Aederchen und Schnüren, vielfach auch parallel vorhandenen Schieferungsflächen, zwischen die Materialien des Kontakthofes eingelagert erscheinen. Solche injizierte Massen weisen oft den normalen Mineralbestand von granitischen Apliten und Pegmatiten auf: Quarz, Orthoklas, Mikroklin, saure Plagioklase; auch helle und dunkle Glimmer, Turmaline, blasse Granaten und Titanit kommen darin vor, sowie etwa noch eine grüne Hornblende und ein diopsidischer Augit. Der injizierte Gesteinsanteil ist gewöhnlich reich an Biotit und Muscovit, manchmal auch an Hornblende, Granat und Sillimanit. Oft ist es aber nicht möglich, den Mineralbestand der beiden Anteile scharf zu scheiden; es läßt sich nur sagen, daß den injektionsmetamorphen Gesteinen besonders die Mineralien der tieferen Zonen eigen sind. OH-haltige Komponenten z. B. kommen nur ausnahmsweise vor, etwa in Adern, die zugleich eine Andeutung einer Kristallisationsfolge zeigen und dann den Epidot als letztes Ausscheidungsprodukt einer schon sehr wasserreichen Mutterlauge von niedriger Temperatur erscheinen lassen. Gegenüber den in Kontakthöfen allerdings sehr verbreiteten Injektionsgesteinen fehlt zur Zeit noch die nötige Breite und Tiefe der Erfahrung.

Daselbe gilt bezüglich der Einschmelzmetamorphose und ihren Produkten. Am besten bekannt sind die Veränderungen, welche fremde Einschlüsse in Magmen erleiden; ihre Mineralien werden teilweise resorbiert und zeigen dann charakteristische buchtige Resorptionsformen, die besonders an dunklen Glimmern beobachtet werden können. Eine große Reihe einschlägiger Detailuntersuchungen verdanken wir A. Lacroix. Sehr gründlich, auch in ihren Uebergangsstadien, sind ferner in jüngster Zeit kristalline Schiefer als Einschlüsse in den vulkanischen Gesteinen des Laachersee-Gebietes durch R. Brauns studiert worden. Es scheinen ihnen ursprüngliche Tongesteine zugrunde gelegen zu haben, denn jene Schiefer sind reich an Tonerdesilikaten, wie Disthen, Staurolith, Granat und Glimmer. An Stelle dieser Komponenten treten dann im „pyrometamorphen" Einschluß Sanidin, Cordierit, Spinell, Korund, Almandin, Hypersthen; Biotit erscheint teilweise wieder, Muscovit verschwindet ganz, erhalten gebliebene Quarze und Granaten zeigen schöne Resorptionserscheinungen. — Werden endlich einzelne Mineralien (oder ganze Einschlüsse) vollständig gelöst und durch neue Komponenten ersetzt, die aus der Mischung von Magma und Gelöstem hervorgehen, so fallen diese Neubildungen alsdann im allgemeinen wohl kaum in das Gebiet der Metamorphose, sondern unter die Gesetzmäßigkeiten der Mineralbildung aus dem Magma.

Literatur. ***K. Andrée,*** *Die Diagenese der Sedimente und ihre Beziehung zur Sedimentbildung und Sedimentpetrographie Geol. Rdschau., Bd. II, Heft 3, 1911.* — ***F. Becke,*** *Ueber Mineralbestand und Struktur der krist. Schiefer, I. Denkschr. der Wiener Akad. 7, Mai 1903.* — ***Derselbe,*** *Ueber Diophtorite, T. M. P. M. XXVIII.* — ***Derselbe,*** *Fortschritte auf dem Gebiete der Metamorphose, Fortschr. der Mineralogie, Kristallographie und Petrographie, Bd. 1, Jena 1911.* — ***R. Brauns,*** *Die krist. Schiefer des Laacher-See-Gebietes und ihre Umwandlung zu Sanidinit, Stuttgart 1911.* — ***F. Cornu,*** *Die heutige Verwitterungslehre im Lichte der Kolloidchemie, Zeitschr. f. Chemie und Industrie der Kolloide, Bd. 4, Heft 6, 1909.* — ***V. M. Goldschmidt,*** *Die Kontaktmetamorphose im Kristianiagebiet, Videnssk. Skrift. Mat. Natur. Kl. 1911.* — ***Derselbe,*** *Die Gesetze der Mineralassoziation vom Standpunkt der Phasenregel, Zeitschr. f. Anorgan. Chemie, Bd. 71, Heft 4.* — ***U. Grubenmann,*** *Die krist. Schiefer, 2. Aufl., Berlin 1910.* — ***C. R. van Hise,*** *A treatise an metamorphism. U. S. Geol. Survey Monographs, Bd. 47, Washington 1904.* — ***A. Lacroix,*** *Les enclaves des roches volcaniques, Macon 1893.* — ***R. Marc,*** *Vorlesungen über die chemische Gleichgewichtslehre und ihre Anwendung auf die Probleme der Mineralogie, Petrographie und Geologie, Jena 1911.* — ***Derselbe,*** *Die Phasenregel und ihre Anwendung auf mineralogische Fragen, Fortschr. der Mineralogie, Kristallogr. und Petrographie, Bd. 1, Jena 1911.* — ***L. Milch,*** *Ueber Plastizität der Mineralien und Gesteine, Geolog. Rdschau., Bd. 2, Heft 3, 1911.* — ***E. Riecke,*** *Ueber das Gleichgewicht zwischen einem festen, homogen deformierten Körper und einer flüssigen Phase, insbesondere über die Depression des Schmelzpunktes durch einseitige Spannung, Nachr. v. d. k. Ges. d. Wissensch. zu Göttingen, math.-phys. Kl. 1894, 4.* — ***F. Rinne und H. E. Boeke,*** *Ueber Thermometamorphose und Sammelkristallisation, T. M. P. M. XXVII, 1908.* — ***G. Tammann,*** *Kristallisieren und Schmelzen, Leipzig 1903.*

U. Grubenmann.

Mineralien.

Gesteinsbildende Mineralien.

I. Wesentliche Mineralien der Eruptivgesteine: 1. Feldspatgruppe. 2. Gruppe der Feldspatvertreter. 3. Quarz. 4. Glimmergruppe. 5. Pyroxen- und Amphibolgruppe. 6. Olivingruppe. 7. Turmalingruppe. 8. Titanit. 9. Apatit und Zirkon. 10. Erze. II. Wesentliche Mineralien der Sedimente: 11. Kaolin (Porzellanerde) und Ton. 12. Eisenhydroxyde. 13. Carbonspäte. 14. Glaukonit, Thuringit, Chamosit. 15. Opal. 16. Steinsalz, Edel- oder Kalisalze u. a. III. Wesentliche Mineralien der metamorphen Gesteine: 17. Chlorit und Serpentin (Asbest). 18. Talk. 19. Skapolithgruppe. 20. Granatgruppe. 21. Zoisit-Epidot-Reihe. 22. Vesuvian. 23. Staurolith. 24. Cordierit. 25. Andalusit, Sillimanit, Disthen. 26. Eisenglanz. 27. Rutil, Anatas, Brookit. 28. Graphit.

Zur Behandlung kommen hier nur diejenigen Mineralien, welche wesentliche oder nur zufällige (akzessorische) Gemengteile in den mehr oder minder gesetzmäßigen Mineralgemengen bilden, die man allgemein als Gesteine bezeichnet. Da es auch andere Mineralvergesellschaftungen gibt, wie die Erz- und andere nutzbare Lagerstätten bezeugen, muß diese Beschränkung gleich hier anfangs ausgesprochen werden.

In vielen Fällen werden hier chemische Konstitutionsformeln den besprochenen Mineralien beigegeben. Doch muß bemerkt werden, daß wir von der chemischen Konstitution meist so gut wie nichts Sicheres wissen. Die Formeln haben hier lediglich den Zweck, Verwandtschaften und Beziehungen klarer zu gestalten und dadurch der Auffassung und dem Gedächtnisse eine Stütze zu geben.

Die Abbildungen sind großenteils aus dem Grundriß der Kristallographie von G. Linck entnommen, verschiedene auch nach dem Lehrbuche der Mineralogie von Klockmann frei gezeichnet. Beiden Herren sei für die gütige Erlaubnis zur Benutzung ihrer Werke geziemend gedankt.

Entsprechend der allgemeinen Einteilung aller Gesteine in eruptive (aus dem Schmelzfluß gebildete), sedimentäre (aus dem Zerstörungsmaterial aller möglichen anderen festen Gesteine entstandene) und metamorphe (umgewandelte, die nach ihrer Bildung noch weitere Umwandlungen erfahren haben), sollen auch die gesteinsbildenden Mineralien in der entsprechenden Reihenfolge in Kürze beschrieben werden, ohne daß auf die mikroskopischen Verhältnisse besonders eingegangen wird.

I. Wesentliche Mineralien der Eruptivgesteine. 1. Feldspatgruppe. Die hierher gehörigen Mineralien sind die wichtigsten Komponenten fast aller Eruptivgesteine und auf ihrer Zusammensetzung ist wesentlich die Systematik dieser Gesteinsgruppe begründet.

Chemisch sind sie isomorphe Mischungen folgender Silikate, welche auch selbständig vorkommen:

Kalifeldspat (Orthoklas, Sanidin, Adular, Mikroklin)	Si_3O_8AlK
Natronfeldspat (Albit)	Si_3O_8AlNa
Kalkfeldspat (Anorthit)	$Si_2O_8Al_2Ca$

Man unterscheidet chemisch und kristallographisch:

(Kalifeldspat) Orthoklas (Sanidin, Adular)	$Si_3O_8Al(K,Na)$	pseudo-monokline oder Orthoklasreihe
Natronorthoklas	$Si_3O_8Al(Na,K)$	
(Kalifeldspat) Mikroklin (Amazonenstein)	$Si_3O_8Al(K,Na)$	trikline oder Plagioklasreihe
Natronmikroklin (Anorthoklas)	$Si_3O_8Al(Na,K)$	
(Natronfeldspat) Albit (abgekürzt Ab) od. Periklin	Si_3O_8AlNa (= Ab)	
Mischungsreihe: Oligoklas	von Ab_6An_1—Ab_2An_1	
Andesin	„ Ab_3An_2—Ab_4An_3	
Labradorit	„ Ab_1An_1—Ab_1An_2	
Bytownit	„ Ab_1An_3—Ab_1An_6	
(Kalkfeldspat) Anorthit (abgekürzt An)	$Si_2O_8Al_2Ca$ (= An)	

Danach würden alle reinen Natron- und Kalkfeldspäte wie ihre verschiedenen Mischungsprodukte nur triklin kristallisieren, die Kalifeldspäte monoklin und triklin. Man wird später sehen, daß dieser Unterschied möglicherweise nur ein scheinbarer ist.

Die Petrographen unterscheiden aus praktischen Gründen zwischen Alkalifeldspäten (Orthoklas bis inklusive Albit) und Kalknatronfeldspäten, und speziell in der letzteren Reihe sprechen sie von sauren Mischungen (Oligoklas bis Andesin) und basischen (Labradorit bis Anorthit.)

(Pseudo-) Monokline Reihe: Die gewöhnliche Kristallform des weitaus häufigsten aller Feldspäte, des Orthoklases, gibt Figur 1. Die Fläche P heißt Basis und hat wegen der sehr vollkommenen Spaltbarkeit stets mehr oder minder deutlichen Perlmutterglanz; eine zweite, auch noch sehr gute Spaltbarkeit geht nach der Fläche M (Längsfläche). Da diese beiden Spaltrichtungen im monoklinen System senkrecht aufeinander stehen müssen, heißen eben diese Feldspäte Orthoklase (aus dem griechischen: orthos = gerade und klao = brechen,

spalten). T sind die vertikalen Prismenflächen, die auch noch eine geringe Spaltbarkeit besitzen, x und y Querdomen, n ein Längsdoma, o die Pyramide.

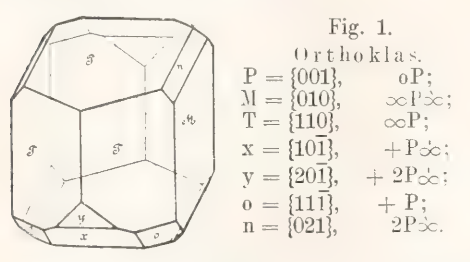


Fig. 1. Orthoklas. P = {001}, oP; M = {010}, ∞P$\breve{\infty}$; T = {110}, ∞P; x = {10$\bar{1}$}, +P$\bar{\infty}$; y = {20$\bar{1}$}, + 2P$\bar{\infty}$; o = {11$\bar{1}$}, + P; n = {021}, 2P$\breve{\infty}$.

Nun tritt auch noch häufig **Zwillingsbildung** ein, und zwar besonders nach drei verschiedenen Flächen:

a) Nach der Querfläche (ist in Fig. 1 nicht angegeben) {100} ∞P$\bar{\infty}$; dabei kann

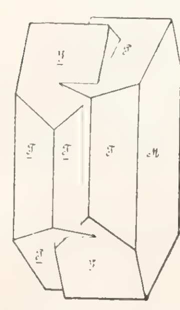


Fig. 2. Orthoklas. T = {110}, ∞P; M = {010}, ∞P$\breve{\infty}$; P = {001}, oP; y = {20$\bar{1}$}, + 2P$\bar{\infty}$. Durchkreuzungszwilling nach ∞P$\bar{\infty}$, {100}. (Karlsbader Zwilling.) Verwachsungsfläche ∞P$\breve{\infty}$, {010}.

aber die Verwachsungsfläche die Längsfläche M sein: **Karlsbader Zwilling**, siehe Figur 2.

b) Nach der Fläche n: **Bavenoer Zwilling**: diese Zwillingsverwachsung kann sich selbstverständlich nach den jeweilig freien n-Flächen wiederholen und so entstehen Drillinge und Vierlinge (Fig. 3).

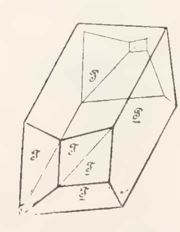


Fig. 3. Orthoklas. T = {110}, ∞P; P = {001}, oP; M = {010}, ∞P$\breve{\infty}$. Berührungszwilling nach {021}, 2P$\breve{\infty}$, welches die Kante zwischen P und M fast gerade abstumpft. Neigung der Zwillingsebene zu P = 44° 57′, daher P:P = 89° 54′. (Bavenoer Gesetz.)

c) Seltener ist das **Manebacher Gesetz**: Zwillingsebene ist dabei die Basis P (Fig. 4).

In der **triklinen Reihe** sind die auftretenden Flächen genau die gleichen; aber hier ist stets die Basis P etwas schief gegen die Längsfläche M geneigt, so daß die Spaltflächen **nicht mehr rechte**, sondern **schiefe Winkel** zueinander bilden, daher der Name **Plagioklas** (griechisch: plagios = schief und klao = spalten).

Da nun hier die Längsfläche nicht mehr Symmetrieebene ist, wird eine weitere Zwillingsbildung möglich, nämlich

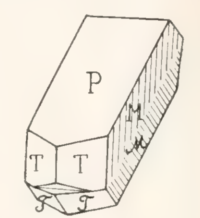


Fig. 4. Orthoklas. T = {110}, ∞P; P = {001}, oP; M = {010}, ∞P$\breve{\infty}$. Zwilling nach {001}, oP (Manebacher Gesetz).

d) Nach der Längsfläche M: **Albitgesetz** (Fig. 5). Diese ist die häufigste Zwillingsbildung bei allen Plagioklasen. Durch oftmalige Wiederholung und gleichzeitiges Dünnerwerden der einzelnen gesetzmäßig mitsammen verwachsenen Individuen entstehen Kristalle, welche die Zwillings-„Lamellen“ oft nur mehr in einer feinen Riefung auf Basis und Querdoma erkennen lassen, was oft zur leichten Erkennung der Plagioklase in Gesteinen dienen kann. Ja die Zwillingslamellen können so dünn werden, daß sie auch unter dem Mikroskope kaum mehr wahrzunehmen sind.

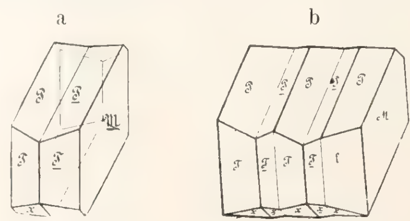


Fig. 5. Plagioklas. P = {001}, oP; M = {010}, ∞P$\breve{\infty}$; T = {1$\bar{1}$0}, ∞,P; l = {110}, ∞P,; x = {10$\bar{1}$}, P,$\bar{\infty}$. a Einfacher Berührungszwilling, b Wiederholungzwilling (polysynthetischer Zwilling) nach M = {010}, ∞P$\breve{\infty}$ (Albitgesetz).

Daraus hat man geschlossen, daß auch die Orthoklase eigentlich triklin sind und ihre scheinbare höhere Symmetrie nur durch diese Häufung entgegengesetzt orientierter feinster Zwillings-Lamellen zustande gebracht wird, denn die in Figur 5b noch deutlich sichtbaren ein- und ausspringenden Winkel der P-Flächen müssen sich bei mikroskopischer Feinheit der einzelnen Individuen kombinieren zu einer scheinbar ungestörten ebenen Fläche, welche dann als monokline Basis P zu den Längsflächen M senkrecht stehen muß.

Ein Beweis für die Richtigkeit dieser kristallographischen Auffassung ist damit erbracht worden, daß es gelungen ist, die Zwillingslamellen trikliner Anorthoklase durch Erhitzen zum Verschwinden zu bringen, also auch optisch den monoklinen Charakter herbeizuführen. Uebrigens kennt man ähnliche Erscheinungen auch von andern mikroskopisch verzwillingten Körpern, z. B. Leucit, Boracit, bei welchen allerdings die Zwillingslamellierung durch Umlagerung infolge von **Polymorphie**, d. h. von verschiedener

Art der Kristallstruktur entsteht, nicht durch Polysymmetrie, d. h. verschiedene Art des Aufbaues aus gleichartigen Kristallstrukturen. Letztere Erklärung wurde hier für die Feldspäte angewendet, möglicherweise trifft aber die erstere eher zu. Man hat also ganz recht, von pseudomonoklinem Charakter der Orthoklase zu sprechen.

e) Endlich haben die Plagioklase noch eine andere Möglichkeit zu einer fünften Art

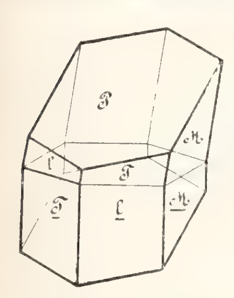


Fig. 6. Albit (Periklinzwilling). M = {010} $\infty P \breve{\infty}$; P = {001} o P; T = {1$\bar{1}$0} ∞'P; l = {110}, ∞ P'.

der Zwillingsbildung, nämlich nach einer Fläche senkrecht zur Querachse b (Fig. 6). Da diese Art am häufigsten an den aufgewachsenen und nach der Querachse gestreckten Albiten vorkommt, welche Perikline heißen, nennt man diese Bildungsart Periklingesetz.

Alle Feldspäte sind vielfach unfrisch, daher ist ihr Aussehen nicht rein weiß und glasig, sondern rötlich und gelblich bei den Alkalifeldspäten, mit Vorliebe auch grünlich bei den Mikroklinen und Kalknatronfeldspäten. Als Umsetzungsprodukte entstehen, was mikroskopisch fast stets nachweisbar ist, Kaliglimmer (Muscovit und Sericit), letzterer besonders, wenn Pressungserscheinungen eine Granit- oder Quarzporphyrmasse betroffen haben, und als Endprodukte entstehen dann reine Sericitschiefer. Ein anderes wichtigeres Zersetzungs- oder Verwitterungsprodukt ist Kaolin (Porzellanerde) und Ton, ersteres nur bei Mitwirkung reduzierender Substanzen. In diesem Falle wurden etwas Kieselsäure und alle Alkalien weggeführt, es blieb als Endprodukt kieselsaure Tonerde = Kaolin oder Ton. So bildet sich also der wichtigste Teil der Ackererde stets aus Feldspat. Endlich bilden Kalknatronfeldspäte infolge ihres Kalkgehaltes noch andere Produkte: es erfolgt ein Zerfall des Moleküles einerseits in reinen Albit und andererseits in verschiedene Kalktonerdesilikate, wie Granat, Vesuvian, Zoisit, Epidot, Prehnit. Man bezeichnet diesen Vorgang, der von einer starken Verfilzung der kleinen Gemengteile begleitet wird, nach dem berühmten Mineralogen und ersten Montblancbesteiger Saussure als Saussuritisierung.

Die Härte der Feldspäte ist gleich 6, daher können sie mit dem Messer nicht mehr geritzt werden. Dieser Umstand und die stets vorhandene Spaltbarkeit nach ebenen Flächen läßt sie neben ihrer hellen Farbe bei nicht gar zu kleinem Korne in den Gesteinen sicher erkennen. Die chemische Angreifbarkeit nimmt mit dem Gehalt an Ca zu; Orthoklas ist nur mit Flußsäure aufzulösen und gibt dann eine färbbare Gallerte, Anorthit schon durch Salzsäure.

In den Gesteinen bilden die Feldspäte oftmals Verwachsungen unter sich und auch mit Quarz. So sieht man vielfach schon mit freiem Auge Orthoklase durchzogen von längeren gewundenen dünnen Schnüren eines anderen Feldspates, nämlich von Albit; man heißt diese Verwachsungsform Perthit. Verwachsungen mit kurzen meist gebogenen Stengeln von grau durchsichtigem Quarz kommen meist vor in der Gesellschaft von sogenannten granitischen Pegmatiten, das sind grobkörnige Tiefengesteinspartien, deren Mineralien sich in gas- und wassererfüllte Hohlräume des Schmelzflusses hinein frei und groß entwickeln konnten; die Verwachsungen deuten stets auf gleichzeitige Ausbildung und werden wegen des merkwürdigen Aussehens der Quarzdurchschnitte auf den Feldspatspaltflächen, die Aehnlichkeit mit arabischen Schriftzeichen haben, Schriftgranit genannt. Auch Verwachsungen von Quarz mit Plagioklas kommen vor.

Die Unterscheidung der einzelnen Feldspatvarietäten ist nur auf chemischem und optischem Wege möglich, bei genügender Größe und Reinheit auch durch das spezifische Gewicht.

Der weitaus häufigste Kalifeldspat in der gewöhnlichen trüben Form des Orthoklases ist ein charakteristischer Gemengteil gewisser kieselsäurereicher Tiefen- und älterer Ergußgesteine, so des Granites, Syenites, Quarzporphyrs, Orthophyrs, des Nephelinsyenites und Nephelinporphyrs. Ferner bildet der Orthoklas einen wesentlichen Gemengteil der Gneise, seien sie aus Eruptivgesteinen oder auch aus Sedimenten herausgebildet, er kann also auch (in letzterem Falle) auf metamorphem Wege entstehen.

In den jüngeren meist tertiären und rezenten Laven wird der Kalifeldspat repräsentiert durch den mehr glasartigen ungetrübten Sanidin, der genau die gleiche chemische Zusammensetzung, aber optisch etwas andere Erscheinungen hat.

Der Adular (von Mons Adula, Bezeichnung des Gotthardgebirges bei den Römern) findet sich in den Zentralalpen auf Klüften aufgewachsen, ferner aufsitzend auf großen Orthoklasen in manchen Granitpegmatiten; er hat dann meist einen milchig bläulichen Schimmer senkrecht zu den Längsflächen und wird gelegentlich unter dem

Namen Mondstein als Halbedelstein verschliffen.

Der Mikroklin, wenn grün gefärbt, unter dem Namen Amazonenstein gleichfalls ein Schmuckstein, bildet größere Kristalle nur in Granitpegmatiten.

Die Natronkalifeldspäte und Anorthoklase sind beschränkt auf gewisse alkalireiche Tiefen- und Ergußgesteine, welche dann vielfach auch Leucit und Nephelin führen.

Albit hat die gleiche Art des Vorkommens, bildet aber oft auch schöne Kristalle auf den Pegmatiten normaler Granite und begleitet als Periklin den Adular auf den halb sublimativ, halb wässerig gebildeten Kluftfüllungen in den Zentralalpen. Auf seine sekundäre Entstehung bei der Saussuritisierung wurde schon hingewiesen. Mikroskopisch charakterisiert er ferner auch gewisse Kontaktgesteine (Adinole), wenn diese ursprünglich mergelartigen Charakter besaßen.

Andesin und Oligoklas helfen beim Aufbau der Diorite und ihrer Ergußformen, der Dacite und Porphyrite mit; in letzterem Falle sind auch sie oft glasartig und ungetrübt, wie der Sanidin und heißen dann Mikrotin. Auch in Graniten und Syeniten pflegen sie in geringer Menge den Orthoklas zu begleiten. — Aus Norwegen kennt man Oligoklase, welche durch Einschlüsse von kleinsten Eisenglanzblättchen einen schönen roten Farbenschiller erhalten; auch diese werden gelegentlich zu Schmucksteinen verarbeitet und heißen Sonnenstein.

Labradorit, Bytownit und Anorthit sind Gemengteile der basischesten Glieder der Eruptivgesteine, also von Gabbro-, Essexit-, Andesit-, Diabas-, Melaphyr- und Basalt-Gesteinen.

Spätiger Labradorit mit seinem durch eingelagerte metallische Blättchen hervorgerufenen Farbenschiller nach blau und grün ist wieder ein Schmuckstein. Anorthit entsteht endlich auch in schönen Kristallen bei der Kontaktmetamorphose mancher Mergel.

Die Feldspäte entstehen also zumeist aus dem Schmelzflusse, manche auch unter Mithilfe von wässrigen Lösungen, wie Adular und Albit; ferner können sie manchmal Kontaktprodukte darstellen und endlich haben sich auch schon Feldspäte künstlich auf sublimativem Wege bei Hüttenprozessen gebildet.

Was die technische Verwendung betrifft, so dient reiner Orthoklas, auch Oligoklas, als Zusatz zur Porzellanmasse, ferner zur Bildung von Glasuren und von Emaille.

2. Gruppe der Feldspatvertreter. Darunter versteht man verschiedene Mineralien, welche, in der Regel farblos oder weiß gleich den Feldspäten, diese teilweise oder sogar ganz in den Erstarrungsgesteinen ersetzen können; hierher gehören Nephelin, Leucit und die Sodalithmineralien.

Nephelin, chemisch ungefähr SiO_4AlNa, also qualitativ wie Albit zusammengesetzt, kristallisiert hexagonal, meist nur als kurzsäuliges sechsseitiges Prisma mit den zwei Basisflächen.

Sein Auftreten ist bezeichnend für die alkalireichen Tiefen- und Ergußgesteine, wie Nephelinsyenit, Phonolith, Theralith, Nephelin-führende Basalte. Sehr oft ist er nicht mehr so glasig frisch und durchsichtig, wie zum Beispiel in den Auswürflingen am Vesuv, sondern besonders in alten Syeniten trübe, grau und grünlich gefärbt und von öligem Aussehen, daher sein Beiname Eläolith oder Oelstein. Er wird eben sehr leicht zersetzt in Zeolithe und auch in undurchsichtigen grünen Glimmer, letzteres besonders als sogenannter Liebenerit im Liebeneritporphyr.

In Begleitung oder Verdrängung des Nephelin erscheint gleichfalls nur in alkalireichen Gesteinen ein schöne Kristalle bildendes Mineral, der Leucit. Chemisch ist er $[SiO_3]_2AlK$, steht also den Kalifeldspäten nahe. Seine Kristallform ist anscheinend das reguläre Ikositetraeder {211} $_2O_2$, welches man früher daher auch Leucitoëder nannte. Es hat sich aber herausgestellt,

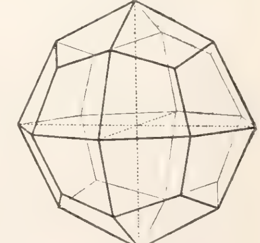


Fig. 7. Leucit, Ikositetraeder {211} 2O2.

daß er aus wahrscheinlich rhombischen Lamellen in vielfacher Zwillingsbildung sich aufbaut, die erst bei Erhitzen auf 560° verschwinden (Paramorphose). Jedenfalls ist der Leucit in regulären Formen auskristallisiert und hat erst in der Temperatur und unter den Druckverhältnissen der Erdoberfläche eine molekulare Umlagerung erfahren. Er kommt vor in den Leucitsyeniten, Leucitophyren und Leucitbasalten.

Die Mineralien der Sodalithgruppe sind gleichfalls auf die alkalireichen Gesteine beschränkt. Sie bilden eine isomorphe Reihe, deren einzelne Glieder sind:

Sodalith $[SiO_4]_3Al_2.AlCl.Na_4$
Nosean $[SiO_4]_3Al_2.AlSO_4Na.Na_4$
Hauyn $[SiO_4]_3Al_2.AlSO_4Na.CaNa_2$
Lasurstein $[SiO_4]_3Al_2.AlSNa.Na_4$.

Die Formel des Hauptvertreters, des Sodalithes, läßt sich in Beziehung bringen zu der des Kalktongranates $(SiO_4)_3Al_2Ca_3$, wobei zunächst 3Ca durch 4Na ersetzt sind und die übrigen Valenzen durch AlCl gesättigt werden. Diesen chemischen Beziehungen entspricht auch die kristallographische Ausbildungsform: beide kristallisieren in der Form des regulären Rhombendodekaeders (Fig. 8). Ebenso ist die aller-

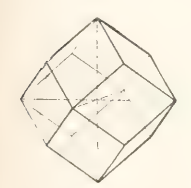


Fig. 8. Sodalith, Rhombendodekaeder {110} ∞O.

dings nicht sehr vollkommene aber doch deutliche Spaltbarkeit nach dem Würfel beiden gemein.

Der eigentliche Sodalith ist farblos, doch werden sowohl er, wie besonders auch der Hauyn und der Nosean durch Beimengung des Lasurstein-Moleküles häufig blau gefärbt.

Alle drei Mineralien treten als Uebergemengteile in Nephelin- und Leucit-führenden Tiefen- und Ergußgesteinen, sowie deren Auswürflingen auf.

Der Lasurstein ist unter dem Namen Lapis Lazuli ein bekannter Schmuckstein, zumal wenn kleine gelbe Schwefelkieskristalle in der ultramarinblauen Masse an den gestirnten Himmel erinnern. In reinem Zustande kennt man ihn nur als Produkt der Kontaktmetamorphose, niemals aus dem Schmelzflusse, und es liegt deshalb der Verdacht nahe, daß auch manche Hauyne usw., mit denen er ja in isomorpher Mischung sich verbindet, ursprünglich sedimentäre Fremdlinge im Schmelzflusse sein könnten.

Außer zu Geschmeide und Ornamenten wurde der Lapis Lazuli früher auch zur Bereitung des natürlichen Ultramarin verwendet.

Noch ein anderes Mineral hat man als Vertreter des Feldspates (oder eines farbigen Minerales) angesehen, weil es gleichfalls meist farblos ist und accessorisch in gewissen Nephelinbasalten sich einstellt; das ist der Melilith. Er ist chemisch eine ziemlich komplizierte Verbindung:

$$Si_5\,O_{19}\ (Al,\ Fe)_2\ (Ca,\ Mg)_6$$

und kristallisiert tetragonal, meist nur kurzes Prisma mit Basis in Kombination, also würfelförmig, und ist teilweise identisch mit einem graubraunen reinen Kontaktmineral, dem Gehlenit. Es ist deswegen vermutet worden, daß er gleichfalls ein Fremdling sei, in eingebackenen Körnern aus mergeligem Nebengesteine übernommen und umgewandelt. Selten sieht man mit freiem Auge auf Klüften von Nephelinbasalt honigbraune Würfelchen dieses Minerals; meist bleibt es mikroskopisch klein, verrät aber seine Gegenwart dann auf chemischem Wege dadurch, daß bei Betupfen des Gesteins mit Säuren sich eine erdige, beim Eintrocknen weiße, Kieselgallerte bildet.

3. Quarz. Nur wenige Eruptivgesteine sind so reich an Kieselsäure, daß diese in Form von Quarz, SiO_2, als letzter Rest aus dem Schmelzflusse sich ausscheiden kann. Hierher gehören alle Granite, viele Diorite und die entsprechenden Ergußformen, Quarzporphyre und Liparite einerseits, Quarzporphyrite und Dacite andererseits. Ferner bildet Quarz einen wesentlichen Bestandteil aller Gneise, aller Glimmerschiefer, vieler Phyllite und endlich der Sandsteine, Grauwacken usw. — Da er an anderer Stelle genauer besprochen wird, möge hier diese kurze Notiz genügen (s. den Artikel „Mineralien. Optisch wichtige Mineralien").

Wegen ihrer hellen Färbung werden alle bis jetzt beschriebenen Mineralien als farblose oder saure Gemengteile der Erstarrungsgesteine bezeichnet; zu ihnen treten dann in Kombination gefärbte Mineralien, die ihnen deswegen als farbige oder basische Gemengteile gegenübergestellt werden. Es sind das die Glimmer-, Hornblende und Augitmineralien, ferner der Olivin, der Turmalin und der Titanit.

4. Die Glimmergruppe. Alle Glimmer kristallisieren pseudohexagonal im monoklinen System (Fig. 9). Da sie eine

Fig. 9. Glimmer c = {001} oP, b = {010} ∞P$\breve{\infty}$, m = {$\bar{1}$11} P, o = {112} — $^1/_2$ P.

unerreichte Spaltbarkeit nach nur einer Fläche, der Basis c = {001} oP besitzen, welche darum stark metallisierenden Glanz hat, sind sie meist überhaupt nur in Form von Blättchenaggregaten ausgebildet. Ihre chemische Zusammensetzung ist kompliziert; man drückt die allgemeine Formel so aus: $[SiO_4]_3Al_2\overset{II}{R}_2\overset{I}{R}_2$, wobei Si teilweise durch Titan, Al durch $\overset{III}{Fe}$ vertreten sein kann; als zweiwertige Elemente $\overset{II}{R}$ treten ein: Fe, Mg, Ca, als einwertige $\overset{I}{R}$: K, Na, Li, F, OH. — Alle Glimmer sind wasser- und alkalihaltig, die meisten auch fluorhaltig. — Physikalisch sind sie durch die Eigenschaft ausge-

zeichnet, daß die Blättchen elastisch biegsam sind, d. h. nach Biegung bei nicht zu starker Beanspruchung in ihre ursprüngliche Lage zurückschnellen. Bei Beginn der Zersetzung sind sie nur mehr gemein biegsam, d. h. sie schnellen nicht mehr zurück, sondern behalten ihre veränderte Form bei. Ihre Härte ist höchstens 3, daher sind sie meist noch mit dem Fingernagel ritzbar.

Die dunklen Glimmer sind oft gebleicht („Katzengold"), oder in Chlorit und Epidot umgewandelt, doch unterliegen sie sonst keiner eigentlichen Verwitterung, sondern nur einer mechanischen Zerkleinerung. Auch in Sandstein und in feinsten tonigen Sedimenten sind sie immer noch in kleinsten Schüppchen erhalten, die momentan aufblitzen können; daher manchmal für derartige Vorkommen der Volksname „Flinz" von „flinsen" = gleißen oder glänzen.

Je nach der chemischen Zusammensetzung unterscheidet man:

I. a) Magnesiaglimmer; vom eisenarmen Phlogopit bis zum eigentlich häufigsten Glimmer, dem eisenreichen Biotit;

II. Magnesiafreie, dafür nur Alkalien führende Glimmer:

b) Kaliglimmer, Muskovit und Sericit.

c) Lithiumglimmer, wenn eisenarm, Lepidolith, wenn eisenreich, Zinnwaldit und Lithionit;

d) Natronglimmer, Paragonit.

Phlogopit, schwach bräunlich rötlich, ist der einzige Glimmer, der als Kontaktmineral in metamorphen Kalken auftritt. Beim eigentlichen schwarzbraunen Biotit hat man nach steigendem Gehalt an Eisen noch unterschieden: Anomit, Meroxen und Lepidomelan. Zumal dieser letztere, der eisen- und titanreichste, wird oft unter Neubildung von Rutil oder auch Eisenoxyd zersetzt und dann rötlich gefärbt, was zu dem Namen Rubellan Anlaß gegeben hat. Im zersetzten Zustande liefert Biotit auch das „Katzengold". Die Biotite sind wesentliche Gemengteile in Graniten, Quarzporphyren, Lipariten, dann in gewissen Syeniten und vielen quarzführenden Dioriten, daher auch in Trachyt, Porphyrit und Andesit, also im allgemeinen in den mehr kieselsäurereichen Eruptivgesteinen. In der Reihe der kristallinen Schiefer sind sie reichlich in Biotitgneis vorhanden und setzen mit Quarz in oft mächtigen Lagen und großer Ausdehnung den Biotitglimmerschiefer zusammen. Große Kristalle finden sich besonders in den Pegmatiten der Granite.

Kaliglimmer oder Muskovit, mit hellem Silberglanz, daher der Beiname „Katzensilber", ist nach dem Biotit der häufigste Glimmer. Trotzdem ist er in Erstarrungsgesteinen selten; nur gewisse Granite führen ihn neben Biotit (Zweiglimmergranite); dagegen ist er in den zugehörigen Pegmatiten stellenweise in kolossalen Tafeln entwickelt, die wegen ihrer leichten Spaltbarkeit, Feuerbeständigkeit und Durchsichtigkeit als Einsätze bei Oefen oder zu Lampenzylindern verwendet werden. Seine Hauptverbreitung hat er auf dem Gebiete der kristallinen Schiefer, in den massenhaften Muskovitgneisen und Muskovitschiefern. Die sekundäre Entstehung aus Feldspat und die Herausbildung von dichten „Sericit"schiefern wurden schon früher erwähnt. Der Muskovit wird in der Elektrotechnik als Isoliermittel verwendet.

Lithiumglimmer sind weniger häufig und, wie es scheint, stets an Granite gebunden. Der pfirsichblütrote Lepidolith bildet pneumatolytisch schöne Kristalle und schuppige Aggregate auf den Pegmatiten und ist vielfach von Turmalin, Topas und Albit begleitet. Der Lithionit gewisser Granite, von Biotit nur durch die Flammenreaktion auf Lithium zu unterscheiden, und der Zinnwaldit, der Fluor- und Lithium reichste Glimmer, sind bezeichnende Gemengteile der eigentlichen Zinnerz-führenden Granite und Zinnerzgänge.

Der Paragonit oder Natronglimmer ist bisher nur spärlich aus den kristallinen Schiefern bekannt geworden. In seinem berühmtesten Vorkommen südlich vom Gotthard bildet er das Muttergestein von Disthen und Staurolith.

5. Pyroxen- und Amphibolgruppe. Die Mineralien dieser zwei Gruppen, welche nach ihren gewöhnlichsten Vertretern auch Augit- und Hornblendegruppe heißen, bilden so ziemlich zwei Parallelreihen von chemischen Verbindungen der Metakieselsäure SiO_3H_2 mit Mg, Fe, Ca, Mn; dazu tritt oft Al. Die reinen Mg-Verbindungen kristallisieren rhombisch, die Ca-Verbindungen monoklin, die Mn-Mischungen triklin. Das Fe-Silikat geht in isomorpher Beimischung durch alle drei Kristallsysteme durch.

Sind auch die chemischen Stoffe, die sich beim Aufbau der beiden Reihen beteiligen, die gleichen, so besteht doch ein Unterschied darin, daß die Amphibole wahrscheinlich die doppelte Molekulargröße haben, daher in durch Gebirgsdruck gequetschten Gesteinen sich an die Stelle der einfacher zusammengesetzten Augite setzen.

Diesen chemischen Verwandtschafts-Verhältnissen entsprechen auch kristallographische; die Kristallform des monoklinen Augites ist, wie Figur 10a zeigt, bestimmt durch die Kombination der Längsfläche mit der Querfläche, und den vier

Seiten eines vertikalen Prismas, dessen Winkel nahezu 90° beträgt, und nach welchem eine nicht sehr vollkommene Spalt-

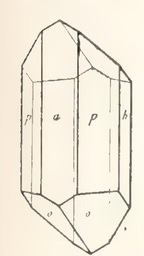


Fig. 10a. Augit. Prisma p = {110}, ∞P; Orthopinakoid a = {100}, ∞P$\bar{\infty}$; Klinopinakoid b = {010}, ∞P$\grave{\infty}$; Positive Pyramine o = 11$\bar{1}$}, + P.

barkeit besteht. Oben und unten treten noch Basis und Hemipyramide hinzu. Der Querschnitt ist also ein fast winkelgleiches Achteck (Fig. 10b).

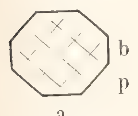


Fig. 10b. Augit-Querschnitt mit Angabe der Spaltrichtungen.

Die monokline Hornblende hat oben und unten die gleichen Flächen, wie der Augit, aber von den Endflächen nur die Längsfläche und dazu die vier vertikalen

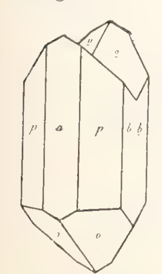


Fig. 11. Augit. p = {110}, ∞P; a = {100}, ∞P$\bar{\infty}$; b = {010}, ∞P$\grave{\infty}$; o = {10$\bar{1}$}, + P. Berührungszwilling nach {100}, ∞P$\bar{\infty}$.

Prismenflächen, welche aber hier einen Winkel von zirka 124° bzw. von 56° einschließen, und nach welchen eine sehr vollkommene Spaltbarkeit besteht. Da die Querfläche in der Regel fehlt, ergibt sich ein sechsseitiger Querschnitt, welcher stark an hexagonale Formen erinnert (Fig. 12 a u. b). Das Hornblendeprisma würde

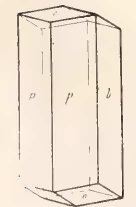
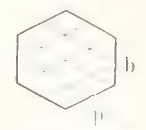


Fig. 12a. Hornblende. Prisma p = {110}, ∞ P; Klinopinakoid b = {010}, ∞P$\grave{\infty}$; Basis c = {001}, oP; Positive Pyramide o = {11$\bar{1}$} + P.

nun am Augite genau der abgeleiteten Form {210} ∞ P$\frac{1}{2}$ entsprechen. — Bei einiger Größe sind also Kristalle von Augit und Hornblende leicht an ihrem Querschnitte, dann aber auch nach dem Winkel und dem Grade der Spaltbarkeit zu unterscheiden, welch letztere bei Augit nur deutlich, bei Hornblende aber sehr vollkommen ist. Die Zwil-



12b. Hornblende. Querschnitt mit Angabe der Spaltrichtungen.

lingsbildung nach der Querfläche {100} ∞P$\bar{\infty}$ ist für beide gleichartig (Fig. 11 und Fig. 13).

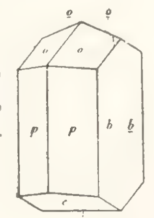


Fig. 13. Hornblende. p = {110}, ∞P; b = {010}, ∞P$\grave{\infty}$; c = {001}, oP; o = {11$\bar{1}$}, + P. Berührungszwilling nach {100}, ∞P$\bar{\infty}$.

Bezüglich der Bildungsweise der beiden Mineralgruppen ist zu betonen, daß zur Bildung von Hornblendemineralien aus Schmelzfluß neben größerem Drucke auch ein größerer Wassergehalt nötig ist, der sich meist auch noch im fertigen Kristalle nachweisen läßt. Bei zu früher Wasserabgabe bildet sich im Schmelzflusse ebenso wie in künstlichen Schlacken stets Augit. Daher sind die ersten Auswürflinge von Basaltvulkanen meist reich an Hornblendekristallen, während die eigentlichen Lavaströme nur mehr Augit führen. Ueber die sekundäre Umwandlung von Augit in Hornblende infolge von Gebirgsdruck, welcher hier nur die Ausbildung der Mineralien mit doppelter Molekulargröße zuläßt, wurde schon oben gesprochen; man nennt diesen Vorgang Uralitisierung und die sekundäre Hornblende Uralit.

Wie aus nachfolgenden Detailausführungen hervorgehen wird, sind alle Pyroxene und Amphibole Gemengteile von Erstarrungsgesteinen oder von kristallinen Schiefern; ferner treten sie als Kontaktprodukte auf, und in gewissen Erzlagerstätten, die wohl stets von magmatischen Ausscheidungen herrühren.

Was nun die speziellen Vorkommen betrifft, so ist Enstatit in großen Kristallen zu finden auf Apatitgängen in Norwegen, zusammen mit Rutil und Apatit. Bronzit begleitet gerne gewisse Serpentinvorkommen. Hypersthen, durch mikroskopische Einlagerungen längs einer Kristallfläche mit kupferartigem Schiller versehen, ist ein Gemengteil mancher Gabbro und Andesite. Schillerspat oder Bastit sind metallisch glänzende, in Serpentin umgewandelte rhombische Pyroxene in manchen Serpentingesteinen.

Der grüne Diopsid ist als Gemengteil

Gliederung der Pyroxengruppe:

Rhombische Reihe:	Enstatit	$[SiO_3]_2Mg_2$
	Bronzit, Hypersthen	$[SiO_3]_2(Mg, Fe)_2$
Monokline Reihe:	Diopsid	$[SiO_3]_2MgCa$ oder $[SiO_3]_2(Mg, Fe)Ca$
	Augit (Fassait, grüner und schwarzer Augit)	$SiO_3(Mg, Fe)CaSiO_3$, $SiO_3(Mg, Fe)(Al, Fe)(Al, Fe)O_3$
	Jadeit	$[SiO_3]_2AlNa$
	Spodumen	$[SiO_3]_2Al(Li, Na)$
	Aegirin (Akmit	$[SiO_3]_2FeNa$
	Wollastonit	$[SiO_3]_2Ca_2$
Trikline Reihe:	Rhodonit	$[SiO_3]_2Mn_2$, $[SiO_3]_2(Mn, Ca)_2$.

von Gesteinen auf gewisse seltenere Granite (Pyroxengranite) und Diorite beschränkt; sonst ist er eine Bildung des Eruptivkontaktes und als solcher mit Granat und Epidot vergesellschaftet. Auch auf gewissen Erzlagerstätten findet er sich.

Der Diallag schließt sich enge an den Diopsid an, unterscheidet sich aber von ihm durch eine sehr vollkommene Teilbarkeit nach der Querfläche und dadurch bedingten blättrigen Aufbau; er kommt nur in Gabbrogesteinen vor.

Augit ist der charakteristische dunkle (schwarze) Gemengteil mancher Gabbro, ferner aller Diabase, Melaphyre, Basalte, dann auch vieler Trachyte, Porphyrite und Andesite. — Der Fassait oder grüne Augit ist stets ein Produkt der Kontaktmetamorphose und sitzt in körnigen Kalken. Ein anderer grüner Augit, Omphacit genannt, hilft mit grüner Hornblende („Smaragdit") und rotem Granat den sogenannten Eklogit aufbauen, ein körniges Gestein aus der Reihe der kristallinen Schiefer.

Jadeit findet sich als dichte grünlichweiße Substanz vergesellschaftet mit Serpentin und Glaukophanschiefern an wenigen Stellen der Erdoberfläche; in prähistorischer Zeit lieferte er ein geschätztes Material zu Steinwerkzeugen und Schmuckgegenständen (s. den Artikel „Nephrit und Jadeit").

Der Spodumen oder Lithionpyroxen tritt nur in den Pegmatiten einzelner Alkaligranite auf; als „Hiddenit" ist er durch Chromgehalt tief smaragdgrün, als „Kunzit" rosarot gefärbt und dient als ziemlich seltener Edelstein.

Der Aegirin oder häufigste Alkalipyroxen der Gesteine ist durch Uebergänge mit dem gemeinen Augite verknüpft. Sein Auftreten ist gebunden an Alkali-Granite und -Syenite, Nephelin-Syenite und deren Ergußformen, besonders Phonolithe, Tephrite und Basanite. Eine durch steile Pyramidenflächen begrenzte Abart, „Akmit", tritt gerne auf Pegmatiten gewisser Alkaligranite auf.

Wollastonit bildet weiße nach der Querachse verlängerte Kristalle in körnigen Kalken, meist in Gesellschaft anderer Kontaktmineralien.

Von triklinen Pyroxenen ist etwas wichtiger nur der Rhodonit, auch Mangankiesel genannt; er findet sich nur auf manganhaltigen Erzgruben in Schweden und im Ural, wo er manchmal zu rotem Ornamentstein verschliffen wird.

Der braune Anthophyllit tritt vereinzelt in kristallinen Schiefern auf, doch scheint er sich auch sekundär nebst Tremolit aus eruptiven Olivin- und Serpentingesteinen bilden zu können („Pilit").

Gliederung der Amphibolmineralien

Rhombische Reihe:	Anthophyllit	$[SiO_3]_4 (Mg,Fe)_4$
Monokline Reihe:	Tremolit	$[SiO_3]_4 Mg_3 Ca$
	Aktinolith	$[SiO_3]_4 (Mg, Fe)_3 Ca$
	Hornblende (Pargasit) grüne, braune, Basalthornblende	$[SiO_3]_2 (MgFe)_3 Ca [SiO_3]_2$, $[SiO_3]_2 (MgFe)_2 (Al, Fe)_2 [(Al,Fe)O_3]_2$
	Arfvedsonit (Barkevikit)	$[SiO_3]_2 (Fe, Mg, Na_2Ca)_4 [SiO_3]_2$, $[SiO_3]_2 (Ca, Mg, Fe)_2 (Al Fe)_2 [Al, O_3]_2$
	Glaukophan	$[Si O_3]_4 Al_2 Na_2$, $[Si O_3]_4 (Mg, Fe)_3 Ca$
	Riebeckit	$[SiO_3]_4 Fe_2 Na_2$, $[SiO_3]_4 Fe_4$
Trikline Reihe:	Aenigmatit	$[Si_4O_{12}]_3 Al_2 Fe_5 (Mn, Mg)_3 Ca K_2 Na_2$

Der faserige weiße Tremolit ist häufig körnigen Kalken und Dolomiten beigesellt, als Produkt der Metamorphose. Der Aktinolith, infolge seines Eisengehaltes dunkelgrün gefärbt, bildet prismatische Kristalle in Chlorit- und Talkschiefern, dann auch eigentliche Lagen von Strahlsteinschiefern innerhalb der kristallinen Schieferreihe. Die feinfaserigen Tremolite und Aktinolithe bilden auch einen Teil des sogenannten Asbestes oder Amiantes; dieser Hornblende-Asbest ist aber weniger biegsam als der Serpentinasbest, dafür allerdings säurebeständiger. Er wird wie letzterer zu feuerfesten Geweben, auch zu Dachpappe verwendet.

Durch Aufnahme von Tonerde bildet der Aktinolith Uebergänge zu echter Hornblende. Der grüne Smaragdit baut mit grünem Omphacit und Granat den Eklogit auf. Eine ganz feinfaserige Art von grüner Hornblende bildet in feinster Verfilzung ein sehr zähes, grünes, kantendurchscheinendes Gestein, den Nephrit, der in in der Steinzeit als Werkzeugmaterial hochgeschätzt war. Diese Nephritvorkommen sind wahrscheinlich alle direkt eruptiv gewesen (Hornblendite), oder wenigstens aus eruptivem Olivingestein (Dunit?) hervorgegangen.

Als eisenarme Hornblenden finden sich ferner „Edenit“ und „Pargasit“ mit anderen Kontaktmineralien in metamorphen Kalken. Die gemeine tiefdunkelgrüne Hornblende ist ein typischer Komponent in den Tiefengesteinen Syenit und Diorit, ferner in Gneisen und Amphiboliten. Größeren Eisengehalt hat die braune Hornblende; die eisenreichste Varietät ist aber die basaltische Hornblende, stets mit nicht unbedeutendem Gehalt an Titan, ein Gemengteil gewisser Gabbros, ferner der Essexite, Andesite und Trachyte.

Arfvedsonit, Glaukophan und Riebeckit, fast stets blau gefärbt, vertreten als Alkaliamphibole die Hornblende in den eruptiven Alkaligesteinen. Doch tritt Glaukophan auch in gewissen Glimmerschiefern und Eklogiten auf; vermutlich ist dabei das Albitmolekül der benachbarten Plagioklase zum Aufbau mit verwendet worden und diese Gesteine wären also aus Gabbro, Diabas und Schalstein entstanden. Krokydolith ist asbestartige blaue und gelbe Alkalihornblende oder auch Aegirin; er findet, pseudomorph in Quarz umgewandelt, als Schmuckstein unter dem Namen „Tigerauge“ Verwendung.

Endlich der trikline Aenigmatit, sehr reich an Titan, ist aus den Laven der Alkaliliparite bekannt geworden.

6. Olivin-Gruppe. Von dieser isomorphen Gruppe sind gesteinsbildend von Bedeutung: Der Monticellit SiO_4CaMg, der Forsterit SiO_4Mg_2, und besonders der eigentliche eisenreiche Olivin $SiO_4(MgFe)_2$, auch Peridot und als Edelstein Chrysolith genannt.

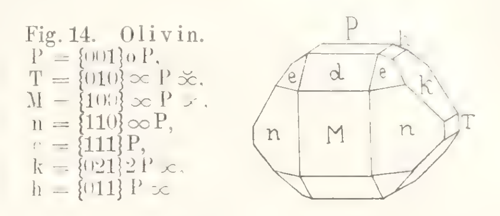


Fig. 14. Olivin.
P = {001}oP,
T = {010}∞P̆∞,
M = {100}∞P̄∞,
n = {110}∞P,
e = {111}P,
k = {021}2P̆∞,
h = {011}P̆∞

Alle diese Mineralien kristallisieren rhombisch. Die Kristallform des Hauptvertreters, des Olivin (Fig. 14), ist charakterisiert zunächst durch die drei senkrecht aufeinanderstehenden Endflächen, P, T, M, nach denen das Mineral deutlich spaltet (daher „Peridot“ von peri-didomi = ringsherum hergeben). Dazu tritt das Prisma n, die Pyramide e und Brachydomen k und h.

Die Härte des Olivins ist die wie des Quarzes gleich 7, daher er sich manchmal in abgerolltem Zustande auf sekundärer Lagerstätte in den sogenannten Seifen erhalten hat. Die Farbe ist hellgrün, der Glanz glasig; mit Salzsäure gelatiniert er.

Olivin bildet einen häufigen Gemengteil der basischeren Erstarrungsgesteine, besonders von Gabbro, Diabas, Melaphyr und Basalt; infolge magmatischer Spaltung innerhalb des noch flüssigen Schmelzflusses hat er sich oft in einer solchen Weise angereichert, daß man von Olivingesteinen oder Peridotiten spricht. Freilich verfallen die Olivine auch hier wie überall sehr leicht der Umwandlung in Serpentin unter Wasseraufnahme. Isolierte Kristalle oder deren Trümmer finden sich öfters in vulkanischen Aschen, nuß- und faustgroße Olivinbomben an allen Basaltvulkanen, oft auch in der Basaltlava selbst eingeschlossen. Eine gelbmetallisch schillernde, sehr eisenreiche Abart des Olivins heißt Hyalosiderit und kommt in den sogenannten Limburgitbasalten im Kaiserstuhl vor. Olivin ist ferner auch ein sehr häufiger und wichtiger Bestandteil in Meteoriten.

Zu bemerken ist, daß alle Chrommineralien, wie Chromeisen, Chromspinell, Chromgranat, ferner das Platin und, wie es scheint, auch der Diamant, wenn noch im ursprünglichen Muttergestein, stets nur in olivin- resp. serpentinreichem Erstarrungsgestein zu finden sind.

Der graue Monticellit ist ein Kontaktprodukt in gewissen metamorphen Kalken. Ebenso ist der Forsterit, meist in grünen serpentinisierten Körnern, ein Begleiter gewisser magnesiareicher Urkalke in dem randlichen Kontakte gegen Gneise; er bringt leicht den Eindruck von alten

Organismenresten hervor, daher nannte man diese Vorkommen früher „Eozoon", besser heißen sie Ophicalcit, d. h. Kalk, dem Serpentin (Ophit) beigemengt ist.

7. Turmalin-Gruppe. Die chemische Zusammensetzung der hierhergehörigen Mineralien ist folgende:

$$[SiO_4]_2-Al-O-B-O-\overset{I}{R_6}.$$

Es liegt also stets ein basisches Borsilikat zugrunde. An Stelle des einwertigen R können treten: Lithium, besonders in rosa Turmalinen, Rubelliten, und in farblosen Achroiten, dann Magnesium in den braunen Magnesiaturmalinen, Chrom in den grünen und den blauen (?) Indigolithen, endlich Eisen in den häufigsten schwarzen Eisenturmalinen oder gemeinen Schörlen. Die hellerfarbigen Arten, besonders in rosa, grün und blau werden häufig als Edelsteine verschliffen und sind kristallographisch oft dadurch interessant, daß die Farbe wechselt, entweder in der Richtung der Längserstreckung der prismatischen Kristalle („Mohrenköpfe", wenn das freie Ende schwarz oder dunkel ist) oder von innen nach außen, indem sich um den Kern andersfarbige isomorphe Mischungen herumgelagert haben.

Die hexagonal-rhomboedrische Kristallform, die dem Turmalin eigen ist, zeigt

Fig. 15a. Turmalin. Trigonales Prisma I. Art. $p = \{10\bar{1}0\}, +\frac{\infty R}{2}$; hexagonales Prisma II. Art. $m = \{11\bar{2}0\}, \infty P2$; am oberen Pol: Positive trigonale Pyramide: $r = \{10\bar{1}1\}, = \frac{R}{2}$; negative trigonale Pyramide: $n = \{01\bar{1}2\}, -\frac{1/2\,R}{2}$; am unteren Pol: positive trigonale Pyramide. $r = \{01\bar{1}\bar{1}\}, +\frac{R}{2}$.

Figur 15a. Oben treten die zwei Halb-Rhomboeder oder trigonalen Pyramiden $r = \{10\bar{1}1\} + \frac{R}{2}$ und $n = \{01\bar{1}2\} - \frac{1/2 R}{2}$ auf, am unteren Pole aber nur r. Man erkennt, daß die Kristalle nach der Vertikalachse polar ausgebildet sind, eine Erscheinung, die man als Hemimorphie bezeichnet. Davon wird das hexagonale Prisma zweiter Art $m = \{11\bar{2}0\} \infty P_2$ nicht berührt, ist also vollflächig mit sechs Flächen vorhanden, während das aus dem Rhomboeder sich herleitende Prisma erster Art $p = \{10\bar{1}0\} + \infty \frac{R}{2}$ infolge der Hemimorphie nur mit drei Flächen als trigonales Prisma auftreten kann. Der Querschnitt der meist ziemlich langprismatischen Kristalle hat also etwa die Form eines sphärischen Dreieckes (Fig. 15b). Das dient bei den gewöhnlichen schwarzen Tur-

Fig. 15b. Turmalin-Querschnitt.

malinen zur leichten Unterscheidung gegenüber den schwarzen Silikaten Augit und Hornblende, welche, wie oben gezeigt, einen achteckigen bzw. sechseckigen Querschnitt aufweisen. Auch der Mangel an jeglicher Spaltbarkeit beim Turmalin kann hier diagnostisch verwertet werden.

Turmalin besitzt große Härte, bis 7,5, und ist gar nicht verwitterbar, daher findet man ihn auch wieder oft auf sekundärer Lagerstätte in den sogenannten Edelstein-Sanden oder -Seifen. Er zeigt, wie alle kristallisierenden Mineralien, mit Ausnahme der regulären, die Erscheinung der Doppelbrechung; weil aber gerade bei seinen gefärbten Arten der eine Strahl vollständig absorbiert wird, hat man dünne Blättchen von Turmalin früher zur Darstellung linearpolarisierten Lichtes verwendet, meist in Form der sogenannten Turmalinzange, bis dieses Mineral später durch den farblosen und daher lichtstärkeren Calcit ersetzt wurde.

Worauf schon sein Borgehalt hinweist, ist der Turmalin das häufigste Produkt sublimativer oder pneumatolytischer Bildungsvorgänge. Daher findet er sich in vielen Graniten, oft randlich angereichert oder auf Klüften radialstrahlig abgesetzt („Turmalinsonnen"), ferner in den drusigen Pegmatiten, dann auf ganz oder teilweise sublimativ gebildeten Erz-Lagerstätten, besonders in der Zinnerzformation, wenn infolge der Verquarzung die Granite zu Greisen umgewandelt sind, und auf einigen Kupfer- und Magneteisenlagerstätten. Auch in Kontaktzonen bildet er eines der häufigsten Kontaktmineralien, mikroskopisch besonders in den Turmalinhornfelsen; dann findet er sich noch in manchen Gneisen, Granuliten und Dolomiten.

Hier würde sich anschließen der fluorhaltige Topas $SiO_4Al_2(F, OH)_2$, welcher, sublimativen Ursprungs, besonders in Verbindung mit der Zinnerzformation, eigene Topasfelse bilden kann. Er wird aber an anderer Stelle besprochen.

8. Titanit (Grothit, Sphen). Chemisch $TiSiO_5Ca$. Er kristallisiert monoklin und zwar, wenn auf Klüften aufgewachsen, meist in gelblichen Durchkreuzungszwillingen, wenn in Gesteinen eingewachsen, gewöhnlich in einer komplizierten Kombination von

Flächen, die den dunkelbraunen Kristallen ungefähr das Aussehen eines Briefkuvertes geben (Fig. 16).

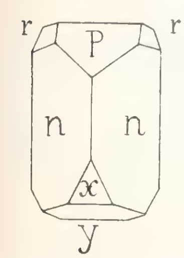


Fig. 16.
Titanit. P = {001} o P. r = {011} P$\breve{\infty}$, x = {10$\bar{2}$} $^1/_2$ P$\bar{\infty}$, y = {10$\bar{1}$} P$\bar{\infty}$, n = {12$\bar{3}$} $^2/_3$ P$\bar{2}$.

Mit brauner Farbe und starkem Glanze (als „Grothit") bildet er einen ziemlich häufigen Gemengteil, besonders in Hornblende führenden Gesteinen, also Syeniten, Dioriten, Amphiboliten, auch in metamorphen Kalken und auf Magneteisenlagerstätten. Die hellgelb gefärbten, oft keilförmig (daher „Sphen" = Keil) oder verzwillingt auftretenden Abarten sind charakteristisch für gewisse Kluftbildungen in den Zentralalpen, wo sie mit anderen Mineralien, besonders titanhaltigen (Rutil, Anatas, Brookit) aber auch Quarz (Bergkristall), Adular, Albit, Epidot u. a. die sogenannte Titanformation bilden, welche nicht rein sublimativ, sondern zugleich thermalen Ursprunges ist, daher pneumatohydatogen genannt wird.

Als dritte Untergruppe der aus dem Schmelzfluß entstehenden Mineralien begreift man außer den farblosen und den farbigen Gemengteilen noch Mineralien, welche in der Regel erste Ausscheidungen sind und vielfach nur mikroskopisch sich nachweisen lassen. Der Sammelname dafür ist: Apatit und Erze.

9. Apatit und Zirkon. Jener ist tertiärer phosphorsaurer Kalk $[PO_4]_3Ca_4 \cdot Ca(F,Cl)$, kristallisiert in hexagonalen Prismen und liefert bei der Verwitterung dem Boden die wichtigen Phosphorsalze. Der Zirkon ist gleich dem Apatit fast stets nur mikroskopisch nachweisbar, nur in einigen Syeniten und Basalten wird er mit brauner oder roter Farbe für das freie Auge sichtbar. Größere Kristalle kennt man aus Amphiboliten und metamorphen Kalken, daneben aber auch aus Klüften in Chloritschiefer, wo er pneumatolytisch gebildet wurde. Häufig ist er auch in abgerolltem Zustande in Edelsteinsanden. Orangerot durchsichtige Arten werden als Edelsteine „Hyacinthe" deswegen ziemlich geschätzt, weil die hohe Lichtbrechung an den Glanz des Diamanten erinnert; leider bleicht die Farbe am Tageslichte allmählich aus. Der Zirkon ist chemisch $ZrSiO_4$. Er kristallisiert im quadratischen System und die Formen sind meist einfach Prisma und Pyramide erster Art oder auch Pyramide zweiter Art (Fig. 17).



Fig. 17. Zirkon. Tetragonale Pyramide und Prisma I. Art. p = {111}, P und m = {110}, ∞P.

10. Erze. Erze sind in allen Erstarrungsgesteinen in mehr oder weniger großer Menge enthalten, meist allerdings nur mikroskopisch direkt nachweisbar, indirekt aber durch das hohe spezifische Gewicht, das sie z. B. den Basalten verleihen. Seltener sind die eruptiven Erze in abbauwürdiger Menge angereichert, wie z. B. in gewissen Gabbrostöcken. Die wichtigen sind Magneteisen und Titaneisen.

Magneteisenerz oder Magnetit ist Fe_3O_4. Es kristallisiert in schwarzen metallisch glänzenden regulären Oktaedern (Fig. 18),

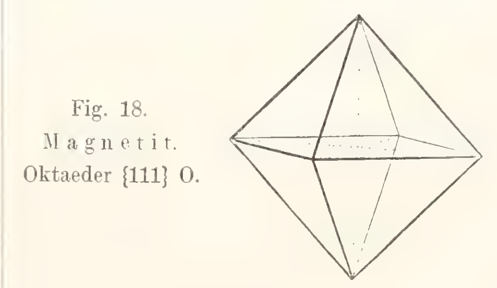


Fig. 18.
Magnetit.
Oktaeder {111} O.

die starken Magnetismus zeigen. Bei großer Anreicherung ist es ein sehr wichtiges Eisenerz. Sonst kommt es noch vor in Linsen und „Fahlbändern" eingesprengt in kristallinen Schiefern mit Augit, Hornblende, Granat und Epidot und ist so direkt gesteinsbildend. In kontaktmetamorphen Sedimenten hat es sich bei der Metamorphose aus anderen sedimentären Eisenerzen herausgebildet. Lose Magneteisensande sind aus manchen Flüssen und von Meeresufern bekannt, ferner aus Edelsteinseifen.

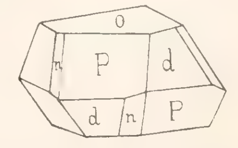


Fig. 19. Titaneisen. P = {10$\bar{1}$1} R, o = {0001} o R, d = {0$\bar{2}$21} — 2 R, n = {22$\bar{4}$3} $^4/_3$ P2.

Titaneisen $(Fe,Ti)_2O_3$ kristallisiert dagegen hexagonal-rhomboedrisch-tetartoedrisch (Fig. 19). Es hat nicht den schwarzen

Strich wie Magneteisen, sondern einen mehr bräunlichen. Man findet es besonders in basischem Erstarrungsgestein, Gabbro, Diabas usw., ferner auch aufgewachsen in der Titanformation der Alpen, wo die nach der Basis tafelig ausgebildeten Kristalle sich gerne zu Rosetten („Eisenrosen") zusammenscharen. Lose ausgewitterte Gerölle heißen Iserin und Titaneisensand. Als Eisenerz ist es nicht zu gebrauchen.

II. Wesentliche Mineralien der Sedimente. 11. Kaolin (Porzellanerde) und Ton. Unter Kaolinit oder Kaolin versteht man ein wasserhaltiges Tonerdesilikat von der Formel $Si_2O_8Al_2H_2 + H_2O$. Es bildet kleinste weiße sechsseitig oder rhombisch aussehende Täfelchen, die aber in Wirklichkeit monoklin kristallisieren. Ihre Aehnlichkeit mit Glimmer tritt noch hervor in der ausgezeichneten Spaltbarkeit nach der Basis {001} oP. In reinem Zustande fettig sich anfühlend, ist Kaolin gleichwohl nicht plastisch. Meist aber sind infolge Beimengung der anderen Gemengteile des ursprünglichen Gesteines Verunreinigungen da in Form von Quarzkörnchen, Eisensilikat und Eisenhydroxyd, Glimmerblättchen, Kalk und kleinsten amorphen und kolloidalen Körperchen, und in diesem verunreinigten Zustande spricht man dann von Ton, der dadurch natürlich je nach der Oxydationsstufe und dem Wassergehalt des Eisens auch blau, braun oder rot verfärbt sein kann. Sind diese Tone sehr reich an den fremden Beimengungen, besonders an Quarz, so fühlen sie sich mager an. Der Gehalt an kolloidalen Substanzen scheint aber allein die Plastizität, diese technisch so wichtige Eigenschaft, zu bedingen.

Das Ausgangsmaterial für die Kaolin- und Tonbildung sind stets die Tonerdesilikate der Eruptiv-Gesteine, also besonders alle Feldspäte, gelegentlich auch Skapolith und Augit; und zwar scheint der Bildungsgang ein verschiedener sein zu können: reiner schuppiger Kaolinit, auch Nakrit und Pholerit genannt, bildet sich wohl nur durch pneumatolytische Prozesse, wie in gewissen Erzgängen, besonders den Zinnerzlagerstätten, wo wesentlich Fluordämpfe eine intensive Umwandlung des Nebengesteins bedingen. Dagegen scheint die gewöhnliche atmosphärische Verwitterung aus Feldspäten nur Muskovit zu produzieren. Wo aber echter Kaolin und Ton auf primärer Lagerstätte zu finden sind, haben kohlensäurereichere und reduzierende Wässer als Agentien gewirkt, sei es direkt in Form von Säurelingen, sei es, daß große Areale feldspathaltiger Gesteine von Moorbildungen zeitweise überdeckt wurden.

Erst wenn durch Wassertransport eine Art natürlicher Trennung und Schlämmung erfolgte, reichern sich die tonigen Substanzen zu fetten Lagern an.

Der Ton hat in hohem Grade die Eigenschaft, Wasser aufzunehmen, wobei er plastisch wird. Wieweit diese Eigentümlichkeit durch das besonders in China übliche „Faulenlassen", also wohl durch Bakterientätigkeit, gefördert wird, entzieht sich zurzeit noch der genaueren Kenntnis. Ist bei der Wasseraufnahme ein gewisses Maximum erreicht, so ist Ton für weiteres Wasser vollständig unzugänglich, d. h. die tonführenden Sedimentlagen sind für die Wasserführung einer Gegend von höchster Wichtigkeit, da auf ihnen das Grundwasser vor dem Versinken in die Tiefe bewahrt wird, als Strom und See zirkuliert, und in natürlichen und künstlichen Anschnitten in Form von Quellen oder Brunnen zutage tritt. Weiterhin ist Ton, wenn auch in verunreinigter Form von Lehm usw., das eigentliche Substrat des Bodens, der die Vegetation trägt und wichtig ist hier seine Fähigkeit, gewisse Salze, besonders die notwendigen Kalisalze, nicht aber den Salpeter, zurückzuhalten, also vor Auslaugung zu bewahren.

Auf die künstliche Verwertung des Tones zur Töpferei, Ziegelfabrikation und Aluminiumdarstellung braucht kaum besonders hingewiesen zu werden.

12. Eisenhydroxyde. Alles durch Erstarrungsgesteine aus der Tiefe gebrachte Eisen, sei es in Form von direkten Erzlagerstätten gebildet, sei es in chemischer Bindung an die farbigen Mineralien geknüpft, liefert bei der atmosphärischen Verwitterung, die ja mechanisch und chemisch in erster Linie das Material für die Sedimentärgesteine bildet, schließlich wasserhaltige Eisenverbindungen, deren häufigster Vertreter das Brauneisen oder Limonit ist, chemisch: $2Fe_2O_3 + 3H_2O$. Auf der Oberfläche von Wasseradern bildet es irisierende Häutchen, auf ihrem Grunde rotbraune Niederschläge, die sich besonders unter Mithilfe von Algen auch am Grunde der Seen und Weiher so anreichern können, daß ein Sumpferz entsteht, je nach Lage verunreinigt durch Ton — „Toneisenstein" — oder Quarzsand — „Raseneisenstein" — oder Humussäuren — „Ortstein". In konkretionären Anhäufungen ist es in vielen Sedimenten eingelagert, wobei allerdings meist erst kohlensaurer Kalk, dann diesen verdrängend Eisenspat gebildet worden war, und erst später durch Oxydation Brauneisen sich herausbildete. Größere Organismen bilden häufig schon durch ihren Fäulnisprozeß ein Attraktionszentrum für derartige Konkretionen. Manchmal sind

auch gewöhnliche Sandsteine durch eisenhaltige Quellen vom Brauneisen ganz durchtränkt worden („Kapuzinersandstein“); anderenteils haben in einzelnen Formationen, besonders im Jura, kleinste Algen oder anorganische Fremdkörper Veranlassung gegeben zur Bildung oolithischer oder pisolithischer, d. h. radial und zugleich konzentrisch schaliger Strukturen in Brauneisenablagerungen, wie in gewissen sogenannten Minetten und in den Bohnerzen des Tertiärs.

Allenthalben bilden dann derartige Ablagerungen, wenn sie eine größere Ausdehnung erreichen, wichtige Eisenerze, die wegen des häufigen Phosphorgehaltes besonders für den Thomasprozeß geeignet sind. Und wie das Brauneisen in seiner so überaus reichen natürlichen Verbreitung den Farbstoff so vieler Ablagerungen, Böden usw. abgibt, so wird es in reinem Zustande auch technisch als Farbe „Ocker“ benützt. Der natürliche Ocker ist stets stark mit Ton verunreinigt (Terra di Siena), oft auch mit Kieselsäure (cyprische Umbra).

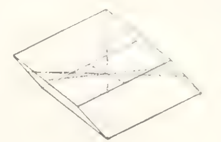
Eine andere, weniger wasserreiche Art bildet der Göthit (Nadeleisenerz) $Fe_2O_3 . H_2O$. Er kristallisiert rhombisch, doch finden sich meistens nur nadel- oder haarförmige Gebilde nach der Vertikalachse, oft in divergentstrahligen Aggregaten von nelkenbrauner Farbe. Häufig stellt er sich am Ausgehenden von Eisenerzlagern ein, besonders von Eisenspat. Nach der Längsfläche dünntafelige Ausbildungsformen, oft hyacinthrot durchscheinend, heißen Rubinglimmer und bilden oft mikroskopisch das Färbemittel für Feldspate, Carnallit, Heulandit. Selten ist der Göthit in abbauwürdiger Menge vorhanden.

Noch heller gefärbt als das Nadeleisenerz ist der Gelbeisenstein oder Xanthosiderit, $Fe_2O_3 . 2H_2O$. Wie auch gelegentlich der Limonit, bildet er meist außen schwarze, innen gelbgefärbte radialfaserig struierte traubenförmige oder stalaktitische Massen („Glaskopf“) im „eisernen Hute“.

13. Carbonspäte: Calcit CO_3Ca, Dolomit $CO_3(Ca,Mg)$, Magnesit, CO_3Mg, Siderit CO_3Fe. Diese Mineralien bilden im allgemeinen zusammen wieder eine isomorphe Reihe, denn alle kristallisieren mit analogen Winkelverhältnissen im hexagonalen System und zwar nach der rhomboedrischen Hemiedrie. Eine Sonderstellung nimmt nur der Dolomit ein, der, vielleicht entsprechend der geringeren Symmetrie seiner chemischen Formel auch einen niedrigeren Grad von Symmetrieverhältnissen aufweist, indem er rhomboedrisch-tetartoedrisch kristallisiert (Rhomboedrisch aussehende Kristalle werden demnach bereits als Ergänzungszwillinge betrachtet). Als Ausgangspunkt für alle ihre Kristallformen nimmt man das infolge sehr vollkommener Spaltbarkeit — daher der alte Bergmannsname „Spat“ — leicht herstellbare Spaltungsrhomboeder $\{10\bar{1}1\} + R$ mit einem Polkantenwinkel von ca. 105°. (Fig. 20.)

Alle Carbonspäte sind natürlich in Säuren

Fig. 20.
Calcit $\{10\bar{1}1\} + R$.

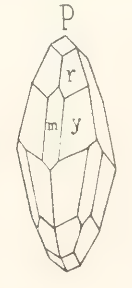


löslich, am leichtesten der Calcit oder Kalkspat, der schon mit verdünnter kalter Säure lebhaft aufbraust. Die Härte geht von 3 bis etwa 4,5.

Das wichtigste Mineral der ganzen Gruppe ist der Calcit. Neben dem Quarze überhaupt das gemeinste Mineral, zeigt er mit über 200 verschiedenen Kristallformen den größten Flächenreichtum unter allen kristallisierenden Mineralien überhaupt.

Figur 21 und 22 geben Kombinationen

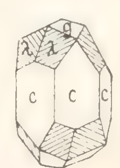
Fig. 21. Calcit.
$P = \{10\bar{1}1\} + R$, $m = \{40\bar{4}1\} + 4R$,
$r = \{21\bar{3}1\}$ R3, $y = \{32\bar{5}1\}$ R5.



von Rhomboedern mit Skalenoedern.

Sehr häufig sind Zwillinge a) nach der

Fig. 22. Calcit.
$g = \{01\bar{1}2\} - \frac{1}{2} R$, $\lambda = \{31\bar{4}2\}$ R2
$c = \{10\bar{1}0\} \infty R$.



Basis (Fig. 23), b) nach dem Rhomboeder $\{01\bar{1}2\} - \frac{1}{2} R$, welches die Polkanten von $\{10\bar{1}1\} + R$ gerade abstumpft (Fig. 24); diese Art der Zwillingsbildung kann auch durch Druck erzeugt werden, weil nach dieser flacheren Rhomboederfläche eine Gleitfläche geht; daher ist diese Zwillingsbildung in stark gepreßten Marmoren mikroskopisch sehr häufig. c) seltener nach dem primären Spaltungsrhomboeder $\{10\bar{1}1\} + R$.

Der kohlensaure Kalk wird durch Erhitzen unter Entweichen von Kohlensäure CO_2 zu Aetzkalk CaO gebrannt; dieser verbindet sich unter Erwärmen mit Wasser (Löschen des Kalkes) zu Kalkhydrat $Ca(OH)_2$ und dieser gelöschte Kalk wird mit

Quarzsand zur Mörteldarstellung verwendet, welcher dadurch erhärtet, daß durch Neuaufnahme von CO_2 aus der Luft wieder kohlensaurer Kalk unter Wasserabgabe sich bildet.

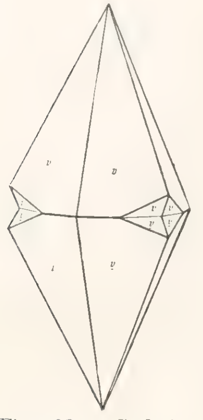


Fig. 23. Calcit. Skalenoeder {21$\bar{3}$1}, +R3 Zwilling nach {0001}, oR.

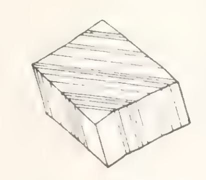


Fig. 24. Calcit. Rhomboeder (R) mit Zwillinglagen nach {01$\bar{1}$2} − 1/2 R.

Kalkspat entsteht in der Natur immer nur aus wässerigen Lösungen bei Temperaturen unter 20° C; diese enthalten den kohlensauren Kalk gelöst als Bikarbonat, bei Verlust von CO_2 wird der einfach kohlensaure Kalk unlöslich und wenn der Vorgang langsam erfolgt, entstehen entweder prachtvolle Kristalle, wie auf Erzgängen und auf Klüften in Basalten (isländischer Doppelspat), oder wenigstens kristallin-spätig struierte Gebilde wie die Stalaktiten, oder das kalkige Bindemittel für gewisse Sandsteine und Konglomerate, oder endlich, und zwar meist unter Mitwirkung von Pflanzen, für das freie Auge porös tuffig aussehende Ablagerungen, wie der Kalktuff oder Travertin, der einen guten Baustein abgibt.

Petrographisch wichtig sind folgende Vorkommen von kohlensaurem Kalk: oolithische Kalke, von konzentrisch radialstrahliger Struktur der einzelnen Körper, welche in der Anordnung der kleinsten Calcitkristalle wohl stets auf einen zentralen Fremdkörper zu beziehen sind. — Dann erdige Kalke, besonders die weiße Schreibkreide, welche fast nur aus den Gehäusen mikroskopischer Foraminiferen sich aufbaut und heute noch in Form von Foraminiferenschlamm große Areale (nicht die tiefsten) des Bodens der Ozeane bedeckt. Auch größere kalkige und kieselige Organismenreste sind in den Kalksteinen oft noch erhalten geblieben, wie denn der kohlensaure Kalk überhaupt das häufigste Versteinerungsmittel darstellt; hierher gehören z. B. die Lumachellen, denen oft Bruchstücke noch irisierender Muschelschalen einen eigentümlichen, manchmal für Ornamentzwecke benutzten, Reiz verleihen. — Die dichten Kalke aber, welche in so riesiger Verbreitung in allen geologischen Formationen sich finden, entstammen nicht etwa einem Niederschlage aus kohlensaurer Lösung, sondern, worauf schon einige oben genannte Beispiele hindeuten, viele Organismen haben die Fähigkeit, das kohlensaure Salz des Calciums unmittelbar aus mineralischer Lösung zu entnehmen und zum Aufbau ihres inneren oder äußeren Skelettes zu verwenden. Und so sind alle dichten Kalke mehr oder minder mikro- bis kryptokristalline, erhärtete Schlammablagerungen, entstanden aus den feinst zerfallenen Materialien der Schalen und sonstigen Skelettresten kalkiger Organismen, deren Gehäuse nach der Verwesung der organischen Substanz zu Boden fallen mußten. Das feinste derartige Schlammprodukt stellen wohl die für Lithographiezwecke verwendeten Solnhofer Platten dar, soweit hier nicht direkte Kalkablagerung anzunehmen ist.

Erst wenn besondere Kräfte, wie Gebirgsdruck oder Einwirkung schmelzflüssiger Massen sich nachträglich einstellen, werden diese kryptokristallinen Kalksteine zu spätig-körnig-kristallinen umgewandelt, zu eigentlichen Marmoren im petrographischen Sinne, wobei allerdings auch die letzten Reste ursprünglich vorhandener größerer Tier- und Pflanzenversteinerungen zugrunde zu gehen pflegen.

Da es sehr viele kalkhaltige Mineralien in den Erstarrungsgesteinen gibt, ist es leicht erklärlich, daß bei der Verwitterung infolge der Einwirkung des kohlensäurehaltigen Regenwassers Kalkspat eines der häufigsten Endprodukte sein muß, das großenteils in gelöstem Zustande weggeführt wird.

Kohlensaurer Kalk ist eines der wichtigsten Mineralien und Gesteine bezüglich der technischen Verwertbarkeit. Als durchsichtiger „Doppelspat", an dem die Doppelbrechung seinerzeit entdeckt wurde, bildet er das Material zur Herstellung linear polarisierten Lichtes, in den sogenannten Nicolschen Prismen, die jetzt an Stelle der veralteten Turmalinplättchen benutzt werden. Als weißer und farbiger Marmor liefert er geschätztes Material für Zwecke der Ornamentik, Bildhauerei und Architektur. Gewöhnlicher Kalk dient als Baustein, ferner zur Darstellung von Mörtel und, wenn mit Ton gemengt, von hydraulischem Mörtel. Die Solnhofer Platten geben die geschätzten Lithographiesteine, Kreide das bekannte Schreib- und Zeichenmaterial, ferner Putz- und Poliermittel. Auch Kohlensäure wird vielfach aus Kreide oder weißem Marmor

gewonnen. In Pulverform dient der Kalk zur Verbesserung kalkarmer Böden.

Eine weniger wichtige Modifikation des kohlensauren Kalkes bildet der rhombisch kristallisierende Aragonit (die Verbindung CO_3Ca ist also dimorph, wahrscheinlich infolge von Polymerie des Aragonites). Er kristallisiert meist in prismatischen weißen Kristallformen, welche im Gegensatze zu Calcit keine Spur von Spaltbarkeit besitzen.

Diese Abart bildet sich meist nur aus warmen Lösungen (über 20° C z. B. als Karlsbader Sprudelstein, Kluftfüllungen in Laven) oder wenn andere verwandte Elemente, z. B. Spuren von Strontium in der Lösung enthalten sind. In den aus warmen Quellen abgesetzten Schwefellagern Siziliens ist er häufig. Auch bildet er die eigentliche Perlmutterschicht mancher Molluskenschalen.

Dolomit, ein Doppelsalz von Calcium- und Magnesiumkarbonat, bildet gleichfalls wie der Kalk ganze Gebirgszüge. Kristalle sind im allgemeinen seltener und dann ist meist nur das Grundrhomboeder mit eigentümlich sattelförmig gekrümmten Flächen entwickelt. Im Gegensatz zu Kalk löst sich Dolomit nicht mehr in kalter verdünnter Salzsäure, und das bildet für den Feldgeologen ein bequemes Mittel, beide zu unterscheiden, wenngleich es viele Uebergänge über dolomitische Kalke bis zu dem reinen Normaldolomit (z. B. Schlerndolomit) gibt.

Dolomit erscheint höchstens in gewissen Salzlagern und in Korallenbildungen als ursprünglicher Absatz. Sonst ist er sekundär hervorgegangen aus kohlensaurem Kalke, dem durch Lösungen Magnesium zugeführt wurde; daher auch sein fast niemals dichtes, sondern körniges, ja „zuckerkörniges" Gefüge, und sein Auftreten auf Erzlagerstätten, die auf thermaler Grundlage entstanden sind. Aragonit scheint dabei mehr zu dieser Umwandlung zu neigen, als der gewöhnliche Calcit. Die Dolomitstöcke in Südtirol werden von mancher Seite als derartig umgewandelte „Korallenriffe" gedeutet.

Magnesit oder Bitterspat, CO_3Mg, bildet farblose Rhomboeder, eingewachsen in Talk- und Chloritschiefer, also in metamorphen Gesteinen, aus deren Mg-Gehalt sie sich herausgebildet haben. Dichte derbe Vorkommen entstanden meist aus Zersetzung von Serpentin, wobei die freiwerdende Kieselsäure oft die ganze Masse in Form von Opal imprägniert. Magnesit wird verwendet zur Gewinnung von Kohlensäure und zur Herstellung feuerfester Ziegel.

Siderit oder Eisenspat, CO_3Fe, in erbsengelben aufgewachsenen Rhomboedern oder in grobspätigen Lagern, die z. B. bei Eisenerz in Steiermark schon seit der Römerzeit zur Eisengewinnung abgebaut werden. Oft bildet er auch radialstrahlige, meist dunkel gefärbte Aggregate auf Klüften von Basalt, als sogenannter Sphärosiderit. In nieren- oder linsenförmigen Konkretionen, die durch Ton („Toneisenstein") oder kohlige Substanzen („Kohleneisenstein") verunreinigt sind, bildet er oft ganze Flötze in meist paläozoischen Formationen. Auf Erzgängen begleitet er als Gangart sulfidische Erze.

In der Regel entsteht Siderit aus kohlensaurem Kalk, in welchem sich aus zirkulierenden Lösungen das Eisen an Stelle des weggeführten Calciums setzt. Durch Oxydation entstehen unter Entweichen der Kohlensäure die entsprechenden Brauneisenerze.

Eisenspat und Toneisenstein liefern ein ganz vorzügliches Material für die Gewinnung von Eisen und Stahl.

14. Glaukonit, Thuringit, Chamosit. Alle drei stehen der Chloritgruppe nahe.

Glaukonit ist ein wasserhaltiges Silikat von Kali, Eisenoxyd und Tonerde. Er bildet grüne Körnchen in den Sedimenten aller Formationen, besonders in Form der „Grünsandsteine", auch noch in den Absätzen der heutigen Tiefsee. Ursprünglich wird er wohl oft als Ausfüllung, „Steinkern", kleinster Foraminiferenschalen gebildet, er deutet stets auf marine Abkunft.

Wegen seines hohen Kaligehaltes, der bis 15% geht, kann er bei reichlicherem Vorkommen als Düngemittel verwendet werden.

Aehnlich zusammengesetzt ist der Seladonit, der in Südtiroler Melaphyren als Umwandlungsprodukt der Augite, dann in manchen Basalten als Ausfüllung der Hohlräume gefunden wird. Diese „Grünerde" z. B. vom Monte Baldo läßt sich als Dünge- und Färbemittel verwenden.

Thuringit, gleichfalls ein wasserhaltiges Tonerde-Eisensilikat mit viel Eisen und von grüner Farbe, derbe und kleinschuppig, oft oolithisch, bildet gelegentlich schichtartige Ablagerungen in paläozoischen Tonschiefern („Thuringitschiefer").

Ganz ähnlich ist der Chamosit, der aber mehr ein dichtes oder klein-oolithisches Eisenerz darstellt. Vorkommen wie bei Thuringit, aber auch noch in jüngeren Formationen, z. B. im Jura.

15. Opal ist festgewordene gallertartige, wasserhaltige Kieselsäure, also chemisch $SiO_2 + x$ (bis 21%) Wasser. Opal kristallisiert niemals, sondern bleibt stets amorph, höchstens bildet er Pseudomorphosen nach anderen Mineralien, z. B. Feldspat und Augit; auch als Versteinerungsmittel ist er gar nicht so selten, wie denn z. B. der Holzopal nichts anderes ist, als verkieseltes fossiles Holz.

Sonst ist er meist derbe, oft kluftfüllend, vielfach bildet er auch nierige und traubige Ueberzüge und stalaktitische Formen. In

gewissen Vorkommen, wie Geyserit und Kieselerde, ist er locker und erdig.

Die festen Opale haben muscheligen Bruch und Glasglanz. Die Färbung wechselt; durch Beimengungen wird die ursprüngliche Farblosigkeit verwischt. Die Härte geht bis 6,5.

Dreifach ist die Entstehungsart des Opal: zum Teil sind heiße Quellen, postvulkanischer Natur, die Träger der gallertigen Kieselsäure gewesen; so sind die edlen Opale und die Feueropale in zersetzten Trachyten gebildet, so sind auch die Kieselsinterbildungen oder Geysirite in Form von Krusten und Stalaktiten an der Mündungsöffnung der Geysiere abgelagert. Zum anderen Teile haben sicher die kohlensäurehaltigen atmosphärischen Wässer genügt, bei der Verwitterung Kieselsäure aus Silikaten oder aus Kieselskeletten von Organismen in Gallertform zu lösen und an anderen Stellen, oft in Form ven Konkretionen, wieder abzusetzen; hierher gehören z. B. die Feuersteine in der Schreibkreide, die Menilitknollen in der Kieselerde, das verkieselte Holz in Wüstengegenden und Basaltgebieten. Und endlich sind die lockeren erdigen Produkte, wie Polierschiefer, Tripel, Kieselguhr, auch der feste Kieselschiefer, Anhäufungen mikroskopischer Kieselpanzer von niedrigsten Tieren und Pflanzen (Radiolarien, Spongien, Diatomeen).

Der edle Opal mit seiner rötlichen oder bläulichen Farbe und seinen bunten Farbenreflexen im Innern bildet einen geschätzten Edelstein. Das Farbenspiel entsteht nicht etwa durch Farbstoffe, sondern bildet sich entweder auf schmalen Sprüngen oder durch eingelagerte dünne Lamellen eines anderen Opales; in beiden Fällen müssen die sogenannten Interferenzfarben dünner Blättchen entstehen, wie sie auch die Perlmutter so schön aufweist. Eine Varietät, der Feueropal, kann bis hyazinthrot werden. Durch Wasserverlust entsteht aus den edlen Opalen der trübe weißliche Hyalophan.

Hyalit ist glasklar durchsichtig und bildet traubige Ueberzüge auf Klüften vulkanischer Gesteine.

Der häufigste ist der ganz undurchsichtige, verschieden gefärbte gemeine Opal, gleichfalls meist postvulkanischen thermalen Ursprunges; porzellan- oder emailleartige Varietäten, die das Wasser verloren haben, heißen Kascholong. Jaspopal ist durch Eisen rot bis gelbbraun gefärbt. Andere farbige undurchsichtige Opale sind Chrysopras und Heliotrop.

Alle Opale sind in heißer Kalilauge löslich.

16. Steinsalz. Edel- oder Kalisalze u. a. Als Mineralien der Sedimentärgesteine wären nun weiter wichtig das stellenweise sehr häufige Steinsalz mit seinen Begleitern Anhydrit und Gips. Auch die technisch so wichtigen Edel- oder Kalisalze unserer norddeutschen Tiefebene gehörten hierher; ferner noch die aus Organismen sich herleitende Kohle und die Bitumenarten mit dem Petroleum. Da aber alle diese an anderen Stellen besprochen werden, möge dieser kurze Hinweis genügen (s. die Artikel „Salzlagerstätten“, „Bitumina“, „Kohlen“).

III. Wesentliche Mineralien der metamorphen Gesteine. 17. Chlorit und Serpentin (Asbest). Die Chloritmineralien stehen in ihrer scheinbar hexagonalen, in Wirklichkeit monoklinen blättrigen Kristallform, in ihrer vollkommenen Spaltbarkeit nach der Basis den Glimmern sehr nahe, nur sind sie grün gefärbt (daher der Name von Chloros = grün) und besitzen nicht mehr die elastische Biegsamkeit der Glimmer, sondern sind nur mehr gemein biegsam. Gleich den Glimmern enthalten sie Wasser gebunden, aber sie führen keine Alkalien, wie jene es tun. Die Härte ist gering, 1—2,5.

Chemisch faßt man die Chlorite auf als Glieder einer isomorphen Reihe, deren eines Endglied der tonerdeführende Amesit (abgekürzt At) ist, $SiO_9Al_2Mg_2H_4$, während am anderen Ende der Reihe der tonerdefreie Serpentin (Antigorit, abgekürzt Sp) steht, $Si_2O_9Mg_3H_4$. An Stelle von Mg kann teilweise Fe-Oxydul, an Stelle von Al Fe-Oxyd oder Chromoxyd in die Verbindung eintreten.

Es ergeben sich also:

$SiO_9Al_2Mg_2H_4$ Amesit = At
At bis At^4 Sp Korundophilit
At^4Sp bis At^7Sp^3 Prochlorit oder Ripidolith
At^7Sp^3 bis At^3Sp^2 Klinochlor
At^3Sp^2 bis At Sp Pennin
$Si_2O_9Mg_3H_4$ Serpentin = Sp

Von diesen ist der Amesit der seltenste. Korundophilit ist gleichfalls nicht häufig, weil beschränkt auf gewisse metamorphe Korund- oder Schmirgelvorkommen. Das wichtigste Glied der Gruppe ist der Prochlorit oder Ripidolith, der eigentliche Chlorit schlechtweg. Er bildet Tafeln und Schuppen, die zu Häuten verschmelzen können und ist in dieser Form ein wesentlicher Gemengteil der großen Gesteinsgruppe der Chloritschiefer, welche häufig Kristalle von Magneteisen führen; auch Strahlstein und Granat ist sehr oft in ihm eingebettet, und er selbst begleitet in gangartigen Bildungen gerne den Serpentin. Auch der Klinochlor hilft wesentlich die Chloritschiefer aufbauen, und auf Klüften derselben hat er vielfach schöne Kristallaggregate entwickelt, oft in Gesellschaft von Granat und Diopsid. Pennin ist hauptsächlich ein Kluftmineral.

Die Chlorite können also wohl auch

primär entstanden sein, aus wässerigen Lösungen, denen Gase beigemischt waren, daher sie in der Titanformation der Alpen nicht selten sind. Meist aber stellen sie doch nur ein Umwandlungsprodukt dar, hervorgegangen aus anderen farbigen Silikaten, besonders Augit und Hornblende, und es scheint, daß großer Druck die Umwandlung der infolge Verwitterung chloritisierten Diabase (daher der Name „Grünsteine") in Chloritschiefer vollendet.

Eine eigene Betrachtung erfordert der Serpentin, der in seinen dichten Varietäten praktisch von dichtem schuppigem Chlorit nicht zu unterscheiden ist, wenn nicht die chemische Analyse durch Fehlen von Al den Ausschlag gibt. Größere Kristalle kennt man von ihm nicht, er wird stets nur dicht oder faserig.

Der Bruch der dichten Aggregate ist splitterig, doch ist das Gestein bei seiner geringen Härte 3—4 mild und politurfähig; im allgemeinen ist es dunkelgrün gefärbt, wie Chlorit, gelegentlich wird aber durch fleckige Färbung, besonders von grün und rot, das schlangenhautähnliche Ansehen hervorgebracht, das den Namen „Serpentin" (von serpens = die Schlange) rechtfertigt.

Serpentin ist niemals ein primäres Mineral der Gesteine, sondern stets sekundär aus anderen Mineralien gebildet, besonders aus dem chemisch so nahestehenden Olivin unter Aufnahme von Wasser und Abscheidung von Eisenerz, gelegentlich aber auch aus tonerdehaltigen wie Augit. So ist er teilweise aus Eruptivgestein entstanden, wie die serpentinisierten Peridotite beweisen, vielfach aber auch, worauf seine Einlagerung in körnigen Kalken oder Marmoren hinweist, durch Kontaktmetamorphose aus dolomitischem Kalke — unter Ersetzung der CO_2 durch SiO_2 aus dem Schmelzflusse — gebildet worden.

Je nach dem mikroskopischen Gefüge muß man zwei Arten von Serpentin unterscheiden, die vielleicht nur auf Konstitutionsverschiedenheiten (Isomerie) zurückzuführen sind.

1. Chrysotil oder Faserserpentin,
2. Antigorit oder Blätterserpentin.

Zu ersterem gehören: a) der edle Serpentin, lichtgrün oder sogar schwefelgelb gefärbt, gleichmäßig dicht, durchscheinend; er entsteht aus Olivin, meist aber durch Kontaktmetamorphose aus Dolomit. Er wird als Schmuckstein und Ornamentstein verwendet; der „verde antico" gehört zum Teil hierher. b) der gemeine Serpentin, oft gefleckt, eruptiven Ursprungs, stellenweise in großen Massen und Stöcken; er wird ebenfalls verschliffen zu Ornamenten, Reibschalen, Dosen, weiterhin verwendet zu Ofeneinsätzen und zur Darstellung von Bittersalz. c) der Serpentinasbest, reine feinfaserige Arten mit Seidenglanz (Chrysotil im engeren Sinne). Er bildet sich auf Klüften im dichten Serpentin, wobei die Fasern senkrecht zur Kluftfläche stehen. Man verwendet ihn zu Asbestgeweben, wie zu Handschuhen für Feuerwehrleute, dann auch zur Wandausfüllung bei feuersicheren Kassen und zur Dichtung von Dampfrohrverbindungen.

Der Antigorit, blättrig, schuppig, dazu oft noch schiefrig, bildet sich ebenfalls sekundär aus den genannten eruptiven Mineralien und Gesteinen, oft gleichzeitig mit Strahlstein oder Talk.

Durch weitere Zersetzung und Verwitterung des Serpentins entsteht Meerschaum und Talk, daneben Magnesit und Opal.

An die Chlorite können angereiht werden die Sprödglimmer. Kristallographisch schließen sie sich besonders auch in der vorkommenden Spaltbarkeit und der blattartigen Ausbildungsform nach der Basis enge an die echten Glimmer an, die sie aber an Härte weit übertreffen. Chemisch sind sie basische wasserhaltige Mg-Fe-Al-Silikate, oft mit Ca, der im Margarit allein neben Al auftritt. Chloritoid, Ottrelith und Xanthophyllit sind derartige akzessorische Gemengteile gewisser Glimmer- und Chloritschiefer, ebenso wie Margarit, der häufige Begleiter des Schmirgels. Brandisit und Clintonit treten in metamorphen Kalken auf.

18. Talk $(SiO_4)_3Mg_3H_2$ ist vielfach blättrig, wie Glimmer und Chlorit, mit der gleichen vollkommenen Spaltbarkeit und dem Perlmutterglanze auf der Basisfläche, und wahrscheinlich gleichfalls monoklin. Er kommt aber auch dicht vor als Steatit oder Speckstein, Topfstein oder Lavezstein, auch zum Teil als Bildstein oder Agalmatolith. Seine Farbe ist hellgrünlich bis weiß, er fühlt sich fettig an und hat die geringste bekannte Härte: 1.

Talk ist gleichfalls stets nur ein sekundäres, das heißt durch Umwandlung entstandenes Mineral. In den Eruptivgesteinen bildet er höchstens Pseudomorphosen nach Olivin, Bronzit, Tremolit. Seine Hauptverbreitung hat er in der Reihe der kristallinen Schiefer, wo er mächtige Lagen von Talkschiefern zwischen den Lagen von Glimmerschiefer bildet; sie sind jedenfalls alle aus magnesiareichen Eruptivgesteinen hervorgegangen. Die dichten Specksteine sind durch magnesiahaltige Lösungen aus allem möglichen, Granit, Dolomit, Quarz usw. gebildet. Sie werden zu Gasbrennern verarbeitet, auch zu Schmiermitteln, gebrannt für die Elektrotechnik (Umschalter usw.) verwendet; der Bildstein gibt das Material zu Schnitzarbeiten (Buddhastatuetten).

Von ähnlicher Zusammensetzung ist der Meerschaum oder Sepiolith. $Si_3O_{10}Mg_2H_3$, welcher weiße sehr knollige Massen

von geringem spezifischen Gewichte bildet, die wegen ihrer Porosität gleich dem Bimstein auf dem Wasser schwimmen. Genetisch ist er wohl stets durch Zersetzung aus Serpentin zu deuten. Seine technische Verwertung zu Pfeifenköpfen, Zigarrenspitzen ist bekannt.

19. Skapolithgruppe. Unter diesem Namen faßt man wieder die Glieder einer isomorphen Reihe zusammen, deren Extreme folgende Zusammensetzung haben:

$[Si_3O_8]_3Al_3Na_3 + ClNa$ Marialith,

$[Si_2AlO_8]_3Al_3Ca_3 + CaO$ Mejonit.

In der Mitte steht der Mizzonit, der schon kein Chlor mehr hat.

Diese Reihe entspricht auffallend der Plagioklasreihe, nur daß hier Polymerie vorliegt — das dreifache Feldspatmolekül! — und einesteils zu den Albitmolekülen noch ClNa, andernteils zu den Anorthitmolekülen noch CaO getreten ist.

Diese auffallende chemische Analogie kommt auch zum Ausdrucke in dem kristallographischen Verhältnis: die Skapolithe kristallisieren tetragonal, meist nur Prismen und Pyramiden I. und II. Art; aber auch die Feldspäte stehen tetragonalen Verhältnissen ziemlich nahe, wenn man an die rechtwinkelige Spaltbarkeit der Orthoklase und an die Bavenoer Vierlinge denkt.

Die Skapolithe können epigenetisch aus den Feldspäten hervorgehen, wie das in der Umgebung der Chlor-Apatitführenden Gänge in Norwegen der Fall ist. Andererseits können sie zum Beispiel in Albit usw. zerfallen; auch die gleichen Umwandlungsprodukte, wie Kaolin, Muscovit, Epidot, haben sie mit den Feldspäten gemein.

Daneben gibt es auch in Kalk aufsitzende durch Kontaktmetamorphose gebildete Skapolithe, wie in den Bomben des Monte Somma oder wie die zweispitzigen Dipyre der Pyrenäen. Dichte metamorphe Skapolithfelse lagern auch in Gneisen und Amphiboliten.

Zu Skapolith (Mizzonit) gehören auch die körnigen oder strahligen Porzellanspäte im Syenit und körnigen Kalk bei Passau, die schon teilweise in Kaolin umgewandelt sind.

Das Mineral ist, wenn frisch, ziemlich hart, wie Feldspat. Die Farbe ist meist weiß, oft aber auch grau, bräunlich und rötlich. Die Spaltbarkeit nach dem Prisma II. Art ist sehr vollkommen.

20. Granatgruppe. Unter Granaten faßt man eine Gruppe von meist farbigen Mineralien zusammen, die alle ziemlich große Härte (bis 7,5) und schlechte Spaltbarkeit haben, vielfach durchsichtig sind und infolge der ziemlich hohen Lichtbrechung und von Einschlüssen Fettglanz aufweisen. Sie kristallisieren alle im regulären System: die gewöhnlichste Form ist das Rhombendodekaeder {110} ∞ O (Fig. 8), das wegen seiner Häufigkeit gerade an diesem Mineral auch direkt „Granatoeder" genannt wurde. Häufig ist auch die Kombination mit dem Ikositetraeder {211} 2O2, das die Kanten des Dodekaeders gerade abstumpft (Fig. 26).

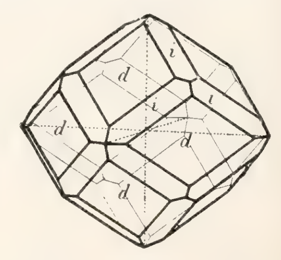


Fig. 26. Granat. d = {110}, ∞O Dodekaeder, i = {211}, 2O2 Ikositetraeder.

Chemisch sind die Granaten Verbindungen der Orthokieselsäure SiO_4H_4 mit drei- und zweiwertigen Elementen; als dreiwertige fungieren Al, Fe, Cr, Ti; als zweiwertige: Ca, Fe, Mg, Mn.

Man unterscheidet im wesentlichsten folgende Haupttypen, wobei vorausgeschickt werden möge, daß es vielfach unmöglich ist, aus der Farbe allein die Zugehörigkeit zu erschließen.

Kalktongranat (Grossular) $[SiO_4]_3Al_2Ca_3$
Kalkeisentongranat (Hessonit, Kaneelstein) $[SiO_4]_3(Al, Fe)_2Ca_3$
Kalkeisengranat (Topazolith, Aplom) $[SiO_4]_3Fe_2Ca_3$
Chromgranat (Uwarowit) $[SiO_4]_3Cr_2Ca_3$
Titangranat (Melanit) $[(Si, Ti)O_4]_3(Fe, Ti, Al)_2Ca_3$
Magnesiaeisentongranat (Almandin) $[SiO_4]_3(Al, Fe)_2(Fe, Mg)_3$
Manganeisentongranat (Spessartin) $[SiO_4]_3(Al, Fe)_2(Mn, Fe)_3$
Pyrop (Caprubin oder böhm. Granat) $[SiO_4]_3(Al, Fe)_2(Mg, Fe)_3$

Grossular, farblos bis hellgrün, ferner Hessonit, hyazinthrot, auch der braune Aplom finden sich in metamorphen Kalken eingeschlossen.

Der dunkelsmaragdgrün - durchsichtige Uwarowit ist immer vergesellschaftet mit Chromerzen in Serpentin, ebenso der gelbe Topazolith.

Almandin, rot, findet sich eingewachsen in kristallinen Schiefern, der rotbraune Spessartin in Granit, in Porphyriten, aber auch in Wetzschiefern, endlich der schwarzrote durchsichtige Pyrop, der seine Farbe einem geringen Gehalt an Chrom verdankt, ausschließlich im Serpentin, hier oft mit einer

radial-faserigen gelblichen Rinde, dem Kelyphit, umsäumt.

Endlich der Melanit tritt sowohl in gewissen alkalireichen Eruptivgesteinen auf, als in den kontaktmetamorphosierten, aus dem Untergrunde stammenden Kalkauswürflingen des Vesuv u. a.

Zweifach wäre demnach die Bildungsart der Granaten: einmal als Produkt der Kontaktmetamorphose, und hier ist Granat weitaus der häufigste neugebildete Gemengteil; auch gewisse granatführende Erzvorkommen gehören hierher. Für das Auftreten in Glimmerschiefern und besonders in Eklogit wird Dynamometamorphose in Anspruch genommen. Andererseits führen auch Eruptivgesteine gelegentlich Granaten, wie den Spessartin, Pyrop und Melanit. Aber das merkwürdige Auftreten des Melanites in beiderlei Arten von Vorkommen, sowohl eruptiv wie metamorph, läßt es doch zweifelhaft erscheinen, ob die anscheinend eruptiv gebildeten Granaten nicht auch bloß losgerissene und im Schmelzfluß umgewandelte Splitter ursprünglich sedimentärer Herkunft darstellen.

Die durchsichtigen Arten, wie Pyrop, Spessartin, Almandin und Kaneelstein werden als Edelsteine verschliffen; besonders Kaneelstein geht vielfach unter dem falschen Namen: Hyazinth. — Die aus den Eklogiten ausgewitterten Almandine geben ein brauchbares Schleifpulver, das fälschlich als Oberpfälzer „Schmirgel" bezeichnet wird.

21. Zoisit-Epidot-Reihe. Die hierher gehörigen Mineralien bilden eine sogenannte dimorphe Reihe, weil ein Teil, die Zoisitmineralien, rhombisch kristallisieren, der andere Teil, die Epidotmineralien monoklin, und weil man, ausgehend von der Kristallform des monoklinen Epidotes, die höher symmetrischen rhombischen Zoisitformen als durch vielfache Zwillingsbildung aus den monoklinen entstanden denken kann.

Als Eigentümlichkeit fällt auf (Fig. 26 und 27), daß ähnlich wie bei Wollastonit die Kristalle nach der Querachse verlängert sind. Die Zwillingsebene {100} ∞ P $\bar{\infty}$ hat der Epidot gemeinsam mit anderen wichtigen monoklinen Mineralien, Augit, Hornblende und Gips.

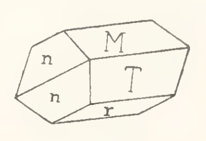


Fig. 26. Epidot. M = {001} oP, T = {100} ∞P$\bar{\infty}$, r = {101} P$\bar{\infty}$, n = {111} P.

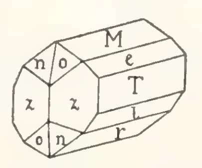


Fig. 27. Epidotzwilling nach {100} ∞P$\bar{\infty}$. z = {110} ∞P; o = {011} P$\breve{\infty}$, e = {101} — P$\bar{\infty}$.

Chemisch ist zunächst der eisenarme Zoisit fast genau zusammengesetzt wie der Grossular, nur sind hier die Mengenverhältnisse der drei- und zweiwertigen Elemente vertauscht, dafür tritt aber die Verbindung —OH (Hydroxyl) ein, um die übrig bleibende Valenz zu sättigen. Es sind also alle Mineralien dieser Gruppe wasserhaltig.

Rhombisch kristallisiert: Zoisit: $[SiO_4]_3Ca_2Al_2.Al.OH$ } (dimorph.)
Monoklin „ : Klinozoisit: $[SiO_4]_3Ca_2Al_2.Al.OH$ }
Epidot (Pistazit): $[SiO_4]_3Ca_2(AlFe)_2.Al.OH$
Piemontit (Manganepidot): $[SiO_4]_3Ca_2(MnAl)_2.Al.OH$
Orthit: $[SiO_4]_3Ca_2(AlCe, Fe)_2.Al.OH$.

Zoisit bildet meist derbe Stücke oder faserige Aggregate nach der Querachse, von grauer oder bräunlich grauer Farbe. Er findet sich namentlich in kristallinen Schiefern, besonders wenn sie Hornblende führen, wie die Amphibolite und Eklogite, und ist dort wohl meist entstanden durch Saussuritisierung aus Plagioklas (siehe diesen). Gelegentlich sind derartige Zoisite in benachbarte granitische Pegmatite übernommen worden.

Klinozoisit ist eisenarmer Epidot von rötlicher Farbe, und tritt gelegentlich als Kontaktmineral auf.

Der eisenreiche Epidot, das verbreitetste Mineral der Gruppe, verdankt dem Fe-Gehalt seine überaus charakteristische dunkle gelbgrüne Farbe, welche an Pistazien oder grüne Mandeln erinnert und ihm den Nebennamen Pistazit eingetragen hat. Er spaltet sehr vollkommen nach der Basis M = {001} oP (Fig. 26) und hat starken Pleochroismus. Selten ist er ein primärer Gemengteil der Gesteine, sondern fast stets metamorphen Ursprungs, teilweise als echtes Kontaktmineral, meist im Kalke, teilweise aus Feldspat, Hornblende, Granat und Skapolith gebildet. Ein primärer Gemengteil ist er nur auf den Gängen der sogenannten Titanformation in den Alpen oder in einzelnen granitischen Pegmatiten von ähnlicher halbwässriger Bildung.

Aus obigem geht hervor, daß Epidot sich aus allen möglichen anderen Mineralien sekundär, wohl auch schon durch gewöhnliche Verwitterung bilden kann; dagegen verwittert er selbst niemals, daher kommt er auch noch in Sanden vor, wobei ihn seine

große Härte, bis 7, vor zu großer Abnützung schützt.

Neben Chlorit ist Epidot eines der wichtigsten Gesteinspigmente, zum Beispiel im porfido verde antico; es läßt seine eigentümliche gelbgrüne Farbe ihn auch in dichten Aggregaten in der Regel leicht von Chlorit unterscheiden.

Der Piemontit oder Manganepidot verdankt dem Gehalt an Mangan seine rote Farbe. Selten in größeren Kristallen auf Manganerzlagerstätten, bildet er doch manchmal ein rotes Gesteinspigment, zum Beispiel im roten porfido rosso antico von Djebel Dhoukan in Aegypten, der im Altertum als Ornamentstein vielfach verwendet wurde; der Manganepidot stammt darin von der ursprünglich Mn-haltigen Hornblende und hat dann die ganze Grundmasse um die Oligoklaseinsprenglinge dunkelrot gefärbt.

Endlich der Orthit oder Allanit ist ein Cer-Epidot, der auch andere seltene Elemente, wie Di, La, Y führt; er entsteht immer aus Schmelzfluß, meist in Form mikroskopischer Kristalle in Graniten und Dioriten, doch kennt man auch derbere fettig glänzende pechschwarze Massen, welche Wasser aufgenommen haben.

22. Vesuvian, (auch Idokras, Cyprin, Wiluit, Egeran). Tetragonales Mineral, meist Prismen und Pyramiden I. Art vorherrschend; seltener derb, manchmal in parallelstrahligen Aggregaten, besonders beim Egeran. Er hat fettigen Glanz, keine Spaltbarkeit, die Härte ist 6,5, die Farbe braun und grün, seltener blau (Cyprin). Chemisch ist er

$$[SiO_4]_5Al_2 . Al(OH)F . Ca_6.$$

Vesuvian ist ein ausgezeichnetes Mineral der Kontaktmetamorphose besonders in körnigen Kalken, auf metamorphen Magneteisenlagerstätten und in den aus der Tiefe mitgerissenen Kalkblöcken des Vesuv, woher sein Name. Daneben aber ist er stellenweise auch sublimativ gebildet, worauf schon sein Fluorgehalt hinweist, so zum Beispiel auf Klüften von kristallinen Schiefern in den Alpen, dann in Skandinavien und im Ural.

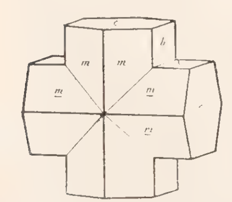


Fig. 28. Staurolith. Prisma m = {110}, ∞ P; seitliche Endfläche b = {010}, ∞ P ̆∞; Basis c = {001}, oP. Durchkreuzungszwilling nach dem Brachydoma {032}; $^3/_2$ P ̆∞.

23. Staurolith. Ein basisches Aluminium-Eisen-Silikat von der komplizierten Zusammensetzung $[SiO_4][Al . OH][AlO_4]Fe$. Er bildet braune rhombische Kristalle, die oft verzwillingt sind nach Art eines rechtwinkligen Kreuzes, daher der Name: „Kreuzstein" (Fig. 28); auch Zwillingsbildungen nach einer Pyramide {232} $^3/_2$P$^3/_2$ kommen vor und diese ergeben dann ein schiefes („Andreas"-)Kreuz.

Spaltbarkeit fehlt, die Härte ist 7,5, der Glanz glasig bis fettig. Vielfach sind die Kristalle nicht homogen, sondern erfüllt von bei der Kristallisation eingeschlossenen Quarzkörnern.

Staurolith ist ein charakteristisches Mineral der Metamorphose und zwar, wie es scheint, nur in ziemlich alten Schiefern enthalten, also in Gneisen, Glimmerschiefern, auch im Paragonitschiefer des Gotthard, hier mit Disthen in paralleler Verwachsung. Wegen seiner Unverwitterbarkeit und seiner Härte bildet er gleich dem Granat, Turmalin, Disthen, Spinell und anderen mikroskopische Gemengteile in Flußsanden, die aus dem Urgebirge kommen, und auch in dem Wüstensande.

24. Cordierit (Dichroit, Pinit). Ein rhombisch kristallisierendes Mineral, in der Regel in der Kombination Basis, Quer- und Längsfläche und Prismen.

Der Habitus ist oft hexagonal. Er hat keine deutliche Spaltbarkeit, Glasglanz, in frischem Zustande schöne blaue Farbe, und ausgezeichneten Pleochroismus von blau zu gelb und grau auf den drei zueinander senkrecht stehenden Richtungen. Daher kommt auch der Beiname Dichroit, der besser Trichroit heißen sollte. Chemisch ist Cordierit eines der wenigen Magnesiumtonerdesilikate

$$[Si_2 O_7]_5Al_8(Mg,Fe)_4[OH]_2.$$

Durch Aufnahme von Wasser und Kali wandelt sich der Cordierit in Muscovit um, wird trübe, undurchsichtig, oft fleckig grün und gelb verfärbt. Ein solches Uebergangsstadium stellt der Pinit dar, welcher meist schön die Kristallform gewahrt hat, während Cordierit gewöhnlich nur derbe auftritt.

Cordierit ist wieder in erster Linie ein echtes Kontaktmineral, entstanden aus Mg-haltenden Tongesteinen; daher bildet er oft gewisse dichte Hornfelse — Cordierithornfelse —, auch die meist gröberen Cordieritgneise gehören hierher. Die Cordierite, die sich in gewissen Granuliten, Graniten, vulkanischen Auswürflingen, dann in Trachyten usw. finden, werden wohl auch schwerlich dem Schmelzflusse direkt entstammen, sondern von eingeschlossenen sedimentären Bruchstücken herrühren.

Durchsichtige Cordieritgeschiebe von Ceylon werden als Wasser- oder Luchssapphire zu Edelsteinen verschliffen.

25. Andalusit, Sillimanit, Disthen, Topas. Diese jetzt folgenden vier Mineralien sind basische Tonerdesilikate und fügen sich wieder zu einer natürlichen Gruppe zusammen.

Andalusit, Sillimanit, Disthen (Cyanit, Rhäticit) sind SiO_5Al_2. Die Verbindung SiO_5Al_2 ist trimorph; Andalusit und Sillimanit kristallisieren beide rhombisch, aber mit verschiedenen Axenverhältnissen. Disthen ist triklin. Andalusit und Disthen stehen zu einander in metamerem, Sillimanit zu beiden in polymerem Verhältnisse.

Topas $[SiO]_4 Al.Al(F.OH)_2$ rhombisch, wurde schon nach Turmalin kurz erwähnt.

Andalusit kristallisiert meist nur in den einfachen Formen von Prisma und Basis; da der Prismenwinkel nahezu 90° ist, wird der Habitus sehr angenähert tetragonal. Die Spaltbarkeit ist schlecht, die Härte geht in frischem Zustande bis 7,5. Dann hat das Mineral auch eine schöne rosarote Farbe; aber oberflächlich ist es in der Regel mit Muscovit bedeckt, in den es sich unter Aufnahme von Kali umwandelt.

Andalusit ist gleichfalls stets ein Mineral der Metamorphose und zwar wohl immer der Kontaktmetamorphose; es tritt in Gneisen und Glimmerschiefern auf, mikroskopisch auch im innersten Kontakthofe von Graniten in Form von dichtem rötlichem Andalusithornfelse. Manchmal sind dann die Andalusitkristalle auch für das freie Auge sichtbar, gelegentlich durch kohlige Substanz im Kerne und an den Prismenecken dunkel gefärbt, für welche Vorkommen der Name Chiastolith gebräuchlich ist. Auch in Graniten und Pegmatiten tritt Andalusit auf, aber wohl auch hier wieder aus dem Nebengestein übernommen.

Sillimanit (Fibrolith), die andere rhombische Modifikation, welche fast nur in filzigen Aggregaten und sehr oft mikroskopisch in anderen Mineralien eingeschlossen auftritt, bildet in Quarz eingewachsen den sogenannten Faserkiesel. Die Farbe ist grau bis bräunlich. Sillimanit ist gleichfalls ein echtes Mineral der Metamorphose in Gneisen und Glimmerschiefern, wobei oft noch unter dem Mikroskop in der Anordnung seiner Stäbchenreihen die Fältelung des ursprünglichen Sedimentes zu erkennen ist.

In prähistorischer Zeit wurde Faserkiesel zu Steinbeilen verarbeitet.

Disthen (so genannt von di = zweifach und sthenos = Kraft, weil er verschiedene Härten hat, nämlich parallel der Längsrichtung Härte 5, senkrecht dazu Härte 7, ursprüglich wurde er aber deswegen so bezeichnet, weil von verschiedenen Kristallen nach Reibung teils positive, teils negative Elektrizität beobachtet wurde) kristallisiert triklin in der Gestalt, wie Figur 29 angibt. Die Form ist also ganz linealartig. In der Regel ist das Mineral blau gefärbt, daher der Name Cyanit; dünnfaserige

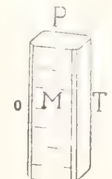


Fig. 29. Disthen.
P = {001} oP, M = {100} ∞P$\bar{\infty}$, T = {010} ∞P$\breve{\infty}$, c = {110} ∞P.

Aggregate, durch kohlige Substanz schwarz gefärbt, heißen Rhätizit. Disthen spaltet sehr gut nach {100} ∞P$\bar{\infty}$.

Cyanit ist gleichfalls ein Mineral der kristallinen Schiefer, er ersetzt aber, wie es scheint, die mit ihm chemisch gleichen Körper Andalusit und Sillimanit nur dann, wenn hoher Druck während oder wahrscheinlich nach der Umwandlung die betreffenden Gesteine getroffen hat. Daher ist er häufig im Glimmerschiefer, gelegentlich mit Staurolith verwachsen und vergesellschaftet im Paragonitschiefer; ferner im Granulit und Eklogit; auch in Goldseifen wurde er schon gefunden.

26. Eisenglanz, (Spekularit, Hämatit, Roteisenerz) Fe_2O_3. Kristallisiert hexagonal nach der rhomboedrischen Hemiedrie. Die schönste Kombination zeigt nebenstehnde Figur 30. Vielfach sind aber

Fig. 30. Haematit. r = {$10\bar{1}1$}, + R, und s = {$10\bar{1}4$}, + $^1/_4$ R, n = {$22\bar{4}3$}, $^4/_3$ P 2.

die Kristalle tafelig nach der Basis {0001} oR oft mit nach den Zwischenachsen aufgewachsenen roten Rutilkriställchen. Bei kleinblätteriger Ausbildung entstehen schuppige Aggregate, welche ganz dicht und erdig werden können (Röthel und Eisenrahm). Stalaktitische radialfaserig gebaute Ausbildungsform nennt man „roten Glaskopf".

Doch ist nur die Körperfarbe und damit der Strich des Eisenglanzes rot; äußerlich ist das Mineral stahlgrau bis eisenschwarz, lebhaft metallisch glänzend, oft infolge Ausbildung von Anlauffarben irrisierend. In reinem Varietäten geht die Härte bis 6,5.

Der Hämatit ist ein wichtiges und weit verbreitetes Eisenerz. In seiner dichten Form wird er auch als Schmuckstein „Blutstein" verarbeitet. Seine Ablagerung in Form von bauwürdigem Erze erfolgt weniger durch Verdrängung des kohlensauren Kalkes durch Eisenlösung und nachfolgende Oxydation des zuerst gebildeten Eisen-

karbonates, infolge Metamorphose meist in großer horizontaler Erstreckung, als wie die heutigen Vulkane das zeigen, durch Wechselwirkung der flüchtigen Gase Eisenchlorid und Wasser [Fe_2Cl_6 (Eisenchlorid) + $3H_2O$ (Wasser) = Fe_2O_3 (Roteisen) + 6ClH (Salzsäure)] auf sublimativem Wege abgeschieden worden. Daher ist er auch ein häufiger Gemengteil besonders saurer Eruptivgesteine, deren Hauptkomponenten, Quarz, Feldspat (besonders im Sonnenstein!) Glimmer, und glasige Grundmasse er rot färbt. Auch die sublimativ gebildeten Eisenrosen in der Titanformation der Alpen gehören zum Teil hierher. In kristallinen Schiefern vertritt er in blättchenförmiger Ausbildung vielfach den Glimmer (Eisenglimmerschiefer) und reichert sich dann gelegentlich zu wirklichen Erzlagern an. Auch aus anderen Eisenerzen kann er durch Oxydation sich herausbilden. In Sedimentärgesteinen bildet er darum leicht auch ein rotes Pigment.

Demnach kann Eisenglanz entstehen aus dem Schmelzfluß oder durch Sublimation, oder endlich auch aus wässeriger Lösung, wenn nachfolgende Oxydation (durch Metamorphose) stattfindet.

27. Titangruppe (mit Ausnahme des Titaneisens und des Titanits): Rutil, Anatas, Brookit. Alle drei Mineralien sind chemisch TiO_2. Aber diese Verbindung kristallisiert infolge von Metamerie trimorph: tetragonal als Rutil (Fig. 31) und

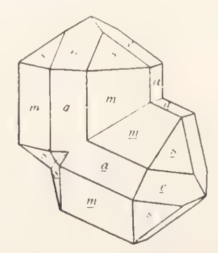


Fig. 31. Rutil. m = {110} ∞P, a = {100} ∞P∞, s = {111} P, e = {101} P∞. Zwilling nach {101} P∞.

Anatas, letzterer aber mit ganz anderen Achsenverhältnissen und daher mit einer viel steileren Primärpyramide. Der Brookit dagegen ist rhombisch.

Rutil mit Härte 6,5 hat wegen seiner hohen Lichtbrechung (2,7, also größer als die des Diamanten mit 2,4) einen fast metallischen Glanz und wird nur in dünnen Blättchen mit seiner eigentlichen Körperfarbe rot durchsichtig. Schwarz ist er nur in der Abart Nigrin, weil er da stark eisenhaltig ist. Er bildet nicht nur einfache Kristalle und Zwillinge, wie Figur 31, sondern vielfach auch Achtlinge, deren Ende dann ring- oder kranzförmig zum Ausgangskristall zurückkehren kann (Fig. 32).

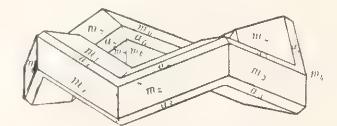


Fig. 32. Rutil.
Achtlingskristall durch wiederholte Zwillingsbildung nach {101} P∞.

Rutil ist das häufigste der drei Titanmineralien. Wie alle diese bildet er einen charakteristischen Gemengteil der teils gasförmig, teils thermal gebildeten Titanformation in den Alpen, auf den Klüften der kristallinen Gesteine; es sind das sowohl freie Kristalle wie auch haarförmige Einwachsungen in Quarz oder in den Eisenrosen. So liefert er auch auf den sublimativen Apatitgängen Norwegens neben Kristallen körnige rote erzartig aussehende Massen. In den eigentlichen Erstarrungsgesteinen ist er primär selten, häufiger aber in allerdings oft mikroskopischer Größe in Gneisen, Glimmerschiefern und auch sedimentären Tonschiefern. Als Gerölle begleitet er manchmal Goldseifen.

Anatas ist gleichfalls tetragonal, meist Prisma mit hoher spitzer Pyramide bildend und dann infolge des hohen Diamantglanzes meist blauschwarz metallartig aussehend, oder breit nach der Basis ausgebildet und dann in der Regel honiggelb oder braun gefärbt mit lebhaftem Glanze. Auch er ist typischer Begleiter der Titanformation. In Eruptivgesteinen bildet er gelegentlich mikroskopische Umwandlungsprodukte. In manchen Goldsanden ist er gefunden worden.

Brookit, meist einzelne Kristalle von der rotbraunen Farbe wie der Rutil. Ebenso auf der Titanformation der Alpen, dann gleichfalls in tafelförmigen Kriställchen durch Umwandlung anderer titanhaltiger Mineralien, besonders von Glimmer, in zersetzten Silikatgesteinen und Lagen abgesetzt (meist mikroskopisch).

28. Graphit. Ist wie der Diamant chemisch reiner Kohlenstoff C. Kohlenstoff ist also dimorph, denn während Diamant regulär und meist klar durchsichtig kristallisiert, bildet der Graphit hexagonale, wahrscheinlich rhomboedrische undurchsichtige Blättchen von dunkelgrauer Farbe. Diese Blättchen spalten nach ihrer Ausbildungsfläche, der Basis, sehr vollkommen, sind gemein biegsam, fühlen sich fettig an und färben mit grauem Striche ab. Graphit ist

für gewöhnlich feuerbeständig, weshalb er zur Anfertigung von Schmelztiegeln benutzt wird. Seine Hauptverwendung findet er zur Herstellung von Bleistiften, ferner als Farbe (Ofenschwarz) und als Schmiermittel. Er stellt also ein technisch sehr wichtiges Mineral dar.

Graphit findet sich in Form von schuppigen Aggregaten in Nestern und Linsen angeordnet und eingelagert in kristallinen Schiefern, Gneisen, Glimmerschiefern, Quarziten, Phylliten und den begleitenden körnigen Kalken. Er ist wesentlich ein Produkt der Metamorphose, und entsteht aus den organischen kohligen Beimengungen der ursprünglich klastischen Gesteine. Losgerissene Schollen davon können auch in echten Eruptivgesteinen eingeschlossen sein. Das Vorkommen auf Gängen in Eruptivgestein, wie in Ceylon, wurde gelegentlich auch auf anorganischen Ursprung zurückgeführt, nämlich auf Ausfällung aus anorganischen Metallkarbiden, wohl mit Unrecht, weil sehr gut auch hier ursprünglich organische Materie in der Tiefe vorgelegen haben kann, die nun unter bestimmten Verhältnissen sublimierte. — Auch in Meteoriten ist Graphit in Knollenform nicht ganz selten. Künstlich bildet er sich durch Ausscheidung aus Roheisen als Hochofengraphit.

Literatur. *Als benützte Literatur, die auch jedem empfohlen werden muß, der sich intensiver mit dem Thema zu befaßen beabsichtigt, seien genannt:* ***P. Groth,*** *Tabellarische Uebersicht der Mineralien. Braunschweig. —* ***F. Klockmann,*** *Lehrbuch der Mineralogie, Stuttgart. —* ***Naumann-Zirkel,*** *Elemente der Mineralogie, Leipzig. —* ***G. Tschermack,*** *Lehrbuch der Mineralogie, Wien. —* ***H. Rosenbusch,*** *Mikroskopische Physiographie der petrographisch wichtigen Mineralien, Stuttgart. —* ***v. Kobell,*** *Lehrbuch der Mineralogie. Neubearbeitet von Oebbeke und Weinschenk, Leipzig. — Ferner die großen Nachschlagewerke:* ***J. D. Dana.*** *A System of Mineralogy und* ***C. Hintze,*** *Handbuch der Mineralogie.*

M. Weber.

Mineralien.

Optisch wichtige Mineralien.

1. Flußspat. 2. Kalkspat. 3. Quarz. 4. Turmalin.

1. **Flußspat** (Fluorit) CaF_2. Aus Lösungen entstanden, charakteristisch für zahlreiche Mineralgänge, z. B. die Zinnerzgänge des Sächsisch-Böhmischen Erzgebirges, die Silbererzgänge von Freiberg, St. Andreasberg, Kongsberg, die Bleiglanzlagerstätten in Derbyshire und Cumberland.

Nur selten farblos (Scherenberg bei Brienz). Gefärbte Flußspäte werden durch Erhitzen wasserhell.

Spez. Gew. 3,18 bis 3,20. Typus für die Härtestufe 4.

Allgemeinste einfache Form: Hexakisoktaeder. Zentrisch symmetrische Kristalle mit 13 zweiseitigen Symmetrieachsen und 9 Symmetrieebenen.

In der Begrenzung ist sehr häufig nur das Hexaeder (100) vorhanden. Oft tritt daneben das Oktaeder (111) auf, das zuweilen auch selbständig ausgebildet ist. Außerdem werden in Kombination mit (100) oder (111) beobachtet das Dodekaeder (110), mehrere Tetrakishexaeder, Triakisoktaeder, Ikositetraeder und Hexakisoktaeder, z. B. (421). Bemerkenswert sind die Durchdringungszwillinge, in denen zwei Individuen zu einer Oktaederfläche symmetrisch liegen; die Begrenzung wird gebildet durch Tetrakishexaederflächen, die nahezu in die Richtung der Hexaederflächen fallen und daher als vizinale Flächen des Hexaeders bezeichnet werden.

Bei der Aetzung mit Salzsäure entstehen auf einer Hexaederfläche tetrasymmetrische, von Ikositetraederflächen begrenzte Eindrücke. Alkalische Aetzmittel greifen den Flußspat nur wenig an.

Einfach brechend mit kleinen Werten der Brechungsindizes (Fig. 1). In hohem Grade durchsichtig. Auch für ultra-

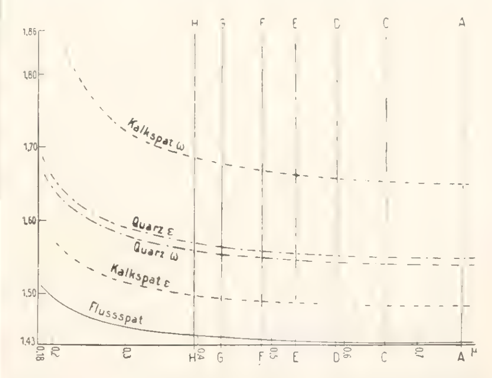


Fig. 1. Dispersion der Brechungsindizes im Flußspat, Kalkspat, Quarz für das ultraviolette und sichtbare Bereich des Spektrums.

violette Strahlen bis 0,120 μ und für ultrarote Strahlen bis 9 μ gut durchlässig. Metallische Reflexion im Ultrarot bei 24,4 μ und 31,6 μ beobachtet von H. Rubens und E. F. Nichols nach der Reststrahlenmethode, ferner im Ultraviolett bei 0,095 μ und im Ultrarot bei 40,5 μ berechnet von F. F. Martens. Dielektrizitätskonstante: 6,92 (H. Starke).

Die folgende Tabelle enthält eine Auswahl von Brechungsindizes für 18° C.

Wellenlänge in μ	Brechungsindex	Beobachter
0,095	metall. Refl.	F. F. Martens (ber.)
0,185	1,51024	„
0,250	1,40732	„
0,312	1,45187	„
h 0,410	1,44112	„
G′ 0,434	1,43960	„
F 0,486	1,43706	„
E 0,527	1,43555	„
D 0,589	1,43385	„
C 0,656	1,43251	„
A′ 0,768	1,43093	„
0,884	1,42682	F. Paschen
1,444	1,42676	E. Carvallo
2,93	1,41820	H. Rubens
5,18	1,39700	„
9,429	1,31612	F. Paschen
51,2	3,47	H. Rubens und
61,1	2,66	E. Aschkinaß
∞	2,63	H. Starke

Die Brechungsindizes nehmen durch eine Temperaturerhöhung von 1° C annähernd um eine Einheit der fünften Dezimale ab.

Die für die technische Optik wichtige Dispersion im Bereiche des sichtbaren Spektrums kann charakterisiert werden durch Differenzen von Brechungsindizes (partielle Dispersion), durch die Differenz der Brechungsindizes für die Fraunhoferschen Linien F und C (mittlere Dispersion) und durch den um Eins verminderten Wert des Brechungsindex für die D-Linie dividiert durch die mittlere Dispersion (reziproker Wert ν der relativen Dispersion):

Partielle Dispersion		
A′ bis D	D bis F	F bis G′
0,00292	0,00321	0,00254
Brechungsindex für D	Mittlere Dispersion C bis F	ν
1,43385	0,00455	95,4

Die von Schott und Genossen dargestellten Glasarten besitzen durchweg einen erheblich geringeren Wert für ν; die Dispersion der Brechungsindizes im Flußspat ist also wesentlich kleiner als bei jenen Gläsern.

Fast alle Varietäten zeigen während der Erhitzung grüne Thermolumineszenz. Erhitzter Chlorophan (rötlich-violetter Flußspat von Nertschinsk) sendet nach kurzer Belichtung mit Sonnenlicht oder Kathodenstrahlen noch wochenlang, namentlich wenn er schwach erwärmt wird, ein intensives grünes Eigenlicht aus. Das Spektrum dieses Phosphoreszenzlichtes reicht, falls es durch Kathodenstrahlen erregt wird, bis ins Ultraviolett und zeigt ein oder mehrere Banden, auf denen wieder eine große Anzahl scharfer Linien liegen. Dieses Linienspektrum rührt von Beimengungen seltener Erden her (W. J. Humphreys, Ch. de Watteville, G. Urbain). Daher ändert es sich in verschiedenen Kristallen und sogar in verschiedenen Schichten desselben Kristalls. Das während der Bestrahlung des Flußspats mit ultraviolettem Licht ausgesandte Fluoreszenzlicht ist blau und liefert ein kontinuierliches Spektrum, dessen größte Helligkeit in verschiedenen Vorkommen ungefähr bei den Wellenlängen 0,430 μ bis 0,450 μ liegt (E. Hagenbach, E. L. Nichols, E. Merritt).

Anwendung. Die Vereinigung schwacher Lichtbrechung mit geringer Dispersion ist bisher durch Glasschmelzung nicht erreicht worden. Daher werden in den Apochromaten Linsen aus Flußspat mit Kron- und Flintglaslinsen kombiniert, um das sekundäre Spektrum und die chromatische Differenz der sphärischen Aberration fast vollkommen zu beseitigen. Ferner gestattet die ausgezeichnete Durchsichtigkeit des Flußspats für ultraviolette Strahlen das Auflösungsvermögen der Mikroskope durch Beleuchtung mit Licht von kurzer Wellenlänge zu erhöhen. Da in diesem Falle nur einfarbiges Licht (Magnesiumlinie: $\lambda = 0{,}280\ \mu$ oder Cadmiumlinie: $\lambda = 0{,}275\ \mu$) benutzt wird, so brauchen die Quarzflußspatobjektive nur für diese Lichtart sphärisch korrigiert zu sein (Monochromate nach A. Köhler). Die mikrophotographische Einrichtung von C. Zeiß für ultraviolettes Licht gestattet das Auflösungsvermögen gegenüber der Beobachtung im weißen Licht zu verdoppeln. Auch für Vakuumspektrographen (nach V. Schumann), die für Messungen im äußersten Ultraviolett (unterhalb $\lambda = 0{,}180\ \mu$) dienen sollen, werden Linsen und Prismen aus Flußspat angefertigt.

2. Kalkspat $CaCO_3$. Nach Quarz das verbreitetste Mineral, aus wässerigen Lösungen kristallisiert. Häufiges Verwitterungsprodukt von Silikatsgesteinen.

Spez. Gew.: 2,72. Typus für die Härtestufe 3.

Allgemeinste einfache Form: Ditrigonales Skalenoeder. a : c = 1 : 0,8543. Zentrisch symmetrische Kristalle mit einer zweiseitigen dreizähligen Vertikalachse, drei einseitigen zweizähligen Querachsen und drei Symmetrieebenen, die auf den Querachsen senkrecht stehen.

Leicht spaltbar nach dem Rhomboeder r (10$\bar{1}$1) (Fig. 2), dessen Flächenwinkel an den Endkanten 74°55′ beträgt. Daraus ergeben sich folgende für die Her-

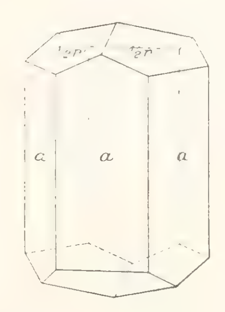
stellung von Polarisationsprismen wichtigen Werte:

Kantenwinkel an einer Endecke 101° 55′.

Neigung einer Fläche gegen die Vertikalachse 45° 23½′.

Neigung einer Endkante gegen die Vertikalachse 63° 44¾′.

der ordentlichen Strahlen, e die äquatoriale Geschwindigkeit der außerordentlichen Strahlen. Es ist o < e, das Ellipsoid umgibt die Kugel (Fig. 5). Der gemeinsame Durchmesser heißt optische Achse. Die Differenz o—e ist negativ; man sagt: Kalkspat hat einen negativen Charakter der Doppelbrechung.



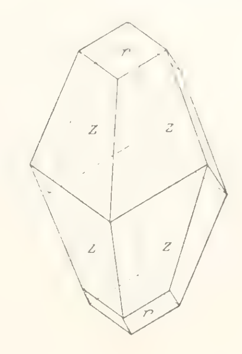


Fig. 2 bis 4. Kalkspat.

Am häufigsten treten folgende Formen auf: das hexagonale Prisma erster Art a (1010), die Basis c (0001), das Rhomboeder ½ r′ (01$\bar{1}$2) (Fig. 3) und das Skalenoeder z (21$\bar{3}$1) (Fig. 4).

Durch Aetzung mit Säuren entstehen auf der Basis trisymmetrische, auf dem Spaltungsrhomboeder und dem Prisma erster Ordnung monosymmetrische Eindrücke.

Nicht selten treten Zwillinge auf, deren Individuen symmetrisch zur Basis (0001) liegen. Zwillingslamellen nach den Flächen des Rhomboeders ½ r′ entstehen durch einfache Schiebungen nach diesen Flächen. Eine Schar solcher Lamellen bewirkt auf einem Flächenpaar des Spaltungsrhomboeders eine charakteristische Riefung nach der längeren Diagonale des Rhombus. Sehr dünne Lamellen zeigen im reflektierten Licht lebhafte Interferenzfarben.

Optisch einachsig mit starker Doppelbrechung von negativem Charakter. Jede durch die Vertikalachse gehende Ebene und die zu dieser Achse senkrechte Ebene sind optisch Symmetrieebenen. Die Vertikalachse ist eine unendlich-zählige Symmetrieachse, jede zu ihr senkrechte Gerade eine zweizählige Symmetrieachse.

Nach dem Huygensschen Gesetz der Fortpflanzung des Lichts (1678) besteht für einfarbiges Licht und konstante Temperatur die Strahlenfläche aus einer Kugel und einem Umdrehungsellipsoid, dessen Umdrehungsachse ein Durchmesser der Kugel ist; ihre Gestalt ist also gegeben durch zwei Größen: den Radius o der Kugel und den Aequatorialradius e des Ellipsoids. o ist die konstante Fortpflanzungsgeschwindigkeit

Man bezeichnet o und e als Hauptlichtgeschwindigkeiten und die reziproken Werte $\omega = 1/o$ und $\varepsilon = 1/e$ als Hauptbrechungsindizes.

Mit der Doppelbrechung ist eine Polarisation des Lichtes verbunden. Der ordentliche Strahl ist polarisiert nach seinem

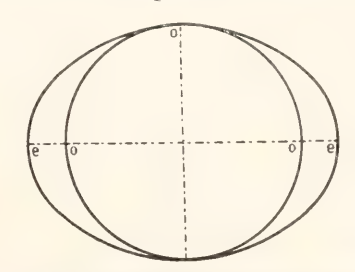


Fig. 5. Strahlenfläche des Kalkspats.

Hauptschnitt, d. h. nach der zur optischen Achse und zur Plattennormale parallelen Ebene, der außerordentliche Strahl ist polarisiert senkrecht zu seinem Hauptschnitt. Das Huygenssche Gesetz der Fortpflanzung und der Polarisation des Lichtes sagt daher aus: Alle nach ihrem Hauptschnitte polarisierten einfarbigen Strahlen pflanzen sich mit konstanter Geschwindigkeit fort, die gegeben ist durch den Radius der Kugel der Huygensschen Strahlenfläche; dagegen besitzen die senkrecht zu ihrem Hauptschnitt polarisierten Strahlen eine mit ihrer Neigung gegen die Vertikalachse veränderliche Geschwindigkeit, welche durch die Radien des Umdrehungsellipsoids der Huygensschen Strahlenfläche dargestellt wird.

Zur Bestimmung von ω und ε ist am geeignetsten ein Prisma, dessen Kante parallel der optischen Achse liegt. Denn in diesem Falle besteht der Schnitt der Strahlenfläche mit der zur Prismenkante senkrechten Ebene aus zwei konzentrischen Kreisen mit den Radien o und e, so daß für ebene Wellen, die zur Kante des Prismas parallel liegen, das gewöhnliche Brechungsgesetz gilt. Infolge des negativen Charakters der Doppelbrechung ist die stärker abgelenkte Welle parallel zur Kante des Prismas polarisiert, also eine ordentliche Welle (Fig. 7 und 9). Die

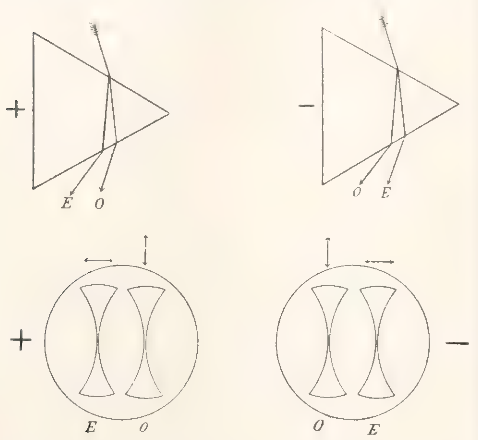


Fig. 6 bis 9. Bestimmung der Hauptbrechungsindizes einachsiger Kristalle mit Hilfe von Prismen, deren Kanten parallel zur optischen Achse liegen.

Quarz. Kalkspat.

folgende Tabelle enthält eine Auswahl der für ω und ε von E. Carvallo ermittelten Werte.

Wellenlänge in μ	ω	ε	Betrag der Doppelbrechung
0,214	1,84580	1,55995	0,28585
0,231	1,80251	1,54557	0,25694
0,275	1,74153	1,52270	0,21883
0,535	1,66267	1,48842	0,17425
D 0,589	1,65837	1,48645	0,17192
0,671	1,65369	1,48433	0,16936
A′ 0,768	1,64974	1,48161	0,16813
0,867	1,64676	1,48137	0,16539
0,991	1,64380	1,48022	0,16358
1,159	1,64051	1,47910	0,16141
1,497	1,63457	1,47744	0,15713
1,909		1,47573	
2,324		1,47392	

Die Brechungsindizes nehmen bei einer Temperaturerhöhung von 1° C um annähernd eine Einheit der sechsten Dezimale für den ordentlichen Strahl, um annähernd eine Einheit der fünften Dezimale für den außerordentlichen Strahl zu. Der hohe Betrag der Doppelbrechung wächst noch mit abnehmender Wellenlänge des Lichtes merklich (Fig. 10 und 11).

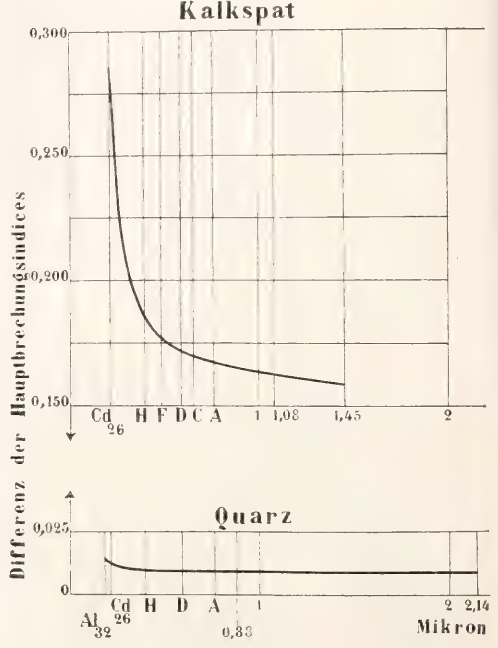


Fig. 10. Dispersion der Doppelbrechung.

Die mittlere Dispersion C bis F sowie der reziproke Wert ν der relativen Dispersion (vgl. Flußspat) haben für den ordentlichen und den außerordentlichen Strahl in den zur Vertikalachse senkrechten Richtungen folgende Werte

	O	E
Mittlere Dispersion C bis F:	0,01346	0,00615
ν:	48,9	79,1

Die Dispersion des Brechungsindex ist für den ordentlichen Strahl im sichtbaren Spektralbereich doppelt so groß als für den außerordentlichen Strahl in den zur Vertikalachse senkrechten Richtungen.

Die Durchlässigkeitsgrenze liegt im Ultraviolett bei ca. 0,200 μ. Im Ultrarot folgen für den ordentlichen Strahl von 2,44 μ an, für den außerordentlichen von 3,28 μ an eine Reihe ausgeprägter Absorptionsstreifen ziemlich rasch aufeinander. Metallische Reflexion des außerordentlichen Strahles tritt im Ultraviolett bei 0,106 μ ein (E. Carvallo und F. F. Martens). Da die Dispersionskurve für den Brechungsindex des ordentlichen Strahles im ganzen

sichtbaren und ultravioletten Spektralbereich fast parallel der des Steinsalzes verläuft, hat der ordentliche Strahl im Ultraviolett wahrscheinlich ähnliche Absorptionsgebiete wie Steinsalz bei 0,110 μ und 0,156 μ (F. F. Martens). Im Ultrarot wurde an einer unter 45° zur Achse geschliffenen Platte metallische Reflexion für den ordentlichen Strahl bei 6,69 μ, für den außerordentlichen bei 11,41 μ und 29,4 μ beobachtet (Reststrahlenmethode, E. Aschkinaß).

Hauptdielektrizitätskonstanten: in Richtung der Vertikalachse 8,02, senkrecht dazu 8,48 (J. Curie).

Interferenzerscheinungen im polarisierten Licht. Bedeutet $n_o - n_e$ die Differenz der Brechungsindizes gegen Luft für eine bestimmte einfarbige Lichtart von der Wellenlänge λ in einer bestimmten Richtung einer Kristallplatte, und l die Plattendicke in dieser Richtung, so ist $\Gamma = l(n_o - n_e)$ der in der Kristallplatte erlangte Gangunterschied beider Strahlen. Von Γ sowie von der Orientierung der Kristallplatte gegen die Hauptschnitte der Polarisationsvorrichtungen eines Polarisationsapparates hängt die beobachtete Interferenzerscheinung ab.

Im konvergenten polarisierten Licht bilden bei gekreuzten Polarisationsprismen für eine senkrecht zur optischen Achse geschnittene Kalkspatplatte (Fig. 11)

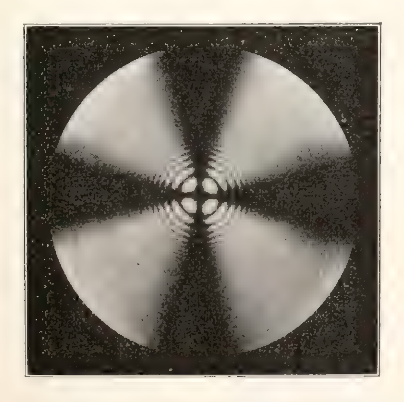


Fig. 11. Kalkspat. Platte senkrecht zur optischen Achse im einfarbigen konvergenten polarisierten Licht zwischen gekreuzten Polarisationsprismen.

die Kurven gleichen Gangunterschiedes $\Gamma = m\lambda$ (worin m = 1, 2, 3, ...) im einfarbigen Licht eine Schar konzentrischer dunkler Ringe, deren Radien im roten Licht größer sind als im blauen. Da $n_o - n_e$ sich mit der Wellenlänge des Lichtes beim Kalkspat merklich ändert, so sind im weißen Licht vom Mittelpunkt des Gesichtsfeldes aus die aufeinanderfolgenden Farben nicht vollkommen identisch mit denen der Newtonschen Farbenskala, die für die Interferenzerscheinungen an den Grenzflächen einfach brechender Medien gilt.

Im parallelstrahligen polarisierten Licht bleibt eine zur optischen Achse senkrechte Platte, da in dieser Richtung $\Gamma = 0$ ist, bei gekreuzten Polarisationsprismen wie ein einfach brechender Körper während einer Umdrehung in ihrer Ebene um 360° vollkommen dunkel. Eine beliebig geschnittene Platte dagegen hellt im weißen Licht das Gesichtsfeld mit einer von der Plattendicke abhängigen Interferenzfarbe auf. Während einer Drehung um 360° wird das Gesichtsfeld viermal vollkommen dunkel, nämlich stets dann, wenn die Polarisationsebene der ordentlichen, im Hauptschnitt polarisierten, oder die der außerordentlichen, senkrecht zum Hauptschnitt polarisierten Welle mit dem Hauptschnitt des Polarisatorprismas zusammenfällt (Normalstellung). Im einfarbigen Licht ist auch bei jeder anderen Lage der Kristallplatte das Gesichtsfeld vollkommen dunkel, wenn der Gangunterschied in der Kristallplatte für die betreffende Lichtart gerade ein ganzes Vielfaches ihrer Wellenlänge ist.

Radialfaserig ausgebildete Aggregate zeigen im parallelstrahligen polarisierten Licht das sogenannte Bertrand-Webskysche Interferenzkreuz, dessen Zustandekommen auf der verschiedenen Neigung der Kristallfasern gegen die Richtung des Strahlenganges beruht, und das somit die reziproke Erscheinung zum Interferenzbild im konvergenten polarisierten Licht ist.

Manche Kalkspäte zeigen bei Bestrahlung mit ultraviolettem Licht rote Fluoreszenz. Nach den Untersuchungen von L. Sohncke und C. G. Schmidt ist diese Fluoreszenz polarisiert. Die intensivste Komponente des Fluoreszenzlichtes liegt parallel zur optischen Achse. Verwendet man auch zur Anregung der Fluoreszenz polarisiertes Licht, so ist die Intensität des Fluoreszenzlichtes beim Kalkspat am stärksten, wenn die erregenden Schwingungen parallel zur optischen Achse liegen. Manche Kristalle zeigen orangerote Phosphoreszenz und beim Zerschlagen Tribolumineszenz.

Anwendung: Kalkspat wird in erster Linie zur Herstellung von Polarisationsprismen verwandt. Bei diesen wird der ordentliche Strahl durch geeignete Wahl des Prismenwinkels und durch totale Reflexion der ordentlichen Wellen an einer zwischen die beiden Prismenhälften eingeschalteten Kittschicht beseitigt, deren Brechungsindex kleiner ist als der Brechungsindex der ordentlichen Wellen und größer als die in Betracht kommenden Indizes der außerordentlichen Wellen. In neuerer Zeit werden meistens nur noch Prismen mit senkrechten Endflächen und normalpolari-

siertem Gesichtsfeld hergestellt. Bei diesen liegt die optische Achse des Kalkspats senkrecht zur Längskante des Prismas, also in der Endfläche selbst. Als hauptsächlichste Fundpunkte des hierzu verwendbaren Materials gelten Helgustadir in Island und Baidar-Thor in der Krim. In der messenden Optik werden zuweilen künstliche Kalkspatzwillingsplatten (nach L. Calderon) bei stauroskopischen Bestimmungen oder bei der Justierung von Apparaten als Halbschattenvorrichtungen benutzt.

3. **Quarz** SiO_2. Am meisten verbreitetes Mineral. Ausgedehnte Gesteinsmassen bildend in den kristallinen Schiefern sowie in den sedimentären Formationen. Hauptbestandteil der meisten Erz- und Mineralgänge als Absatz kieselsäurehaltiger Wässer. Wesentlicher oder akzessorischer Gemengteil in sehr vielen Tiefen- und Ergußgesteinen. Als Rückstand der Verwitterung wichtiger Bestandteil der klastischen Gesteine. Sekundär als Zersetzungs- und Verwitterungsprodukt der Silikatgemengteile in den mannigfachsten Gesteinen. Oft Pseudomorphosen bildend nach anderen Mineralien, z. B. Flußspat, Kalkspat, Schwerspat. Gelegentlich auch Versteinerungsmittel.

Mannigfach gefärbt: farbloser Bergkristall, Rauchquarz, Rosenquarz, Violettquarz (Amethyst). Die Ursache dieser Färbungen ist noch nicht genügend aufgeklärt.

Spez. Gew. 2,65. Typus für die Härtestufe 7.

Allgemeinste einfache Form: Trigonales Trapezoeder. a : c = 1 : 1,0999. Die Vertikalachse ist eine zweiseitige dreizählige Symmetrieachse, senkrecht dazu sind drei gleichberechtigte polare zweizählige Querachsen vorhanden. Dem Symmetriecharakter entspricht das Auftreten sogenannter gewendeter Formen, die sich wie rechte und linke Hand zueinander verhalten.

Die am häufigsten auftretenden Formen sind: das direkte Rhomboeder p (10$\bar{1}$1), das korrelate inverse Rhomboeder z (01$\bar{1}$1), das hexagonale Prisma a (10$\bar{1}$0), die trigonale Bipyramide s (11$\bar{2}$1) bezw. (2$\bar{1}\bar{1}$1), ein trigonales direktes Trapezoeder x (ihkl) bezw. (khil). Die Kombination der beiden Rhomboeder p und z kann die Form einer hexagonalen Bipyramide vortäuschen. Zur Unterscheidung von p und z dienen dann Aetzerscheinungen. Die Flächen von z sind oft infolge natürlicher Aetzung durch wässerige Lösungen von Alkalikarbonaten matt. Verdünnte Flußsäure ruft auf p schon mit bloßem Auge erkennbare, auf z nur mikroskopisch wahrnehmbare asymmetrische Aetzfiguren hervor. Die Orientierung der Aetzeindrücke auf p, z und a kann zur Unterscheidung von rechten und linken Kristallen benutzt werden. Am bequemsten gelingt jedoch diese Trennung mit Hilfe der Trapezoeder x. Rechte Quarzkristalle zeigen nur rechte, linke nur linke direkte Trapezoeder (Fig. 12 und 13).

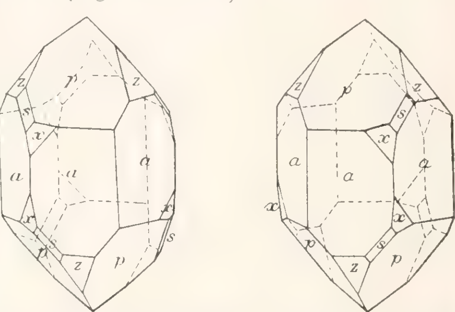


Fig. 12. Linker Kristall. Fig. 13. Rechter Kristall. Quarz.

Die Quarzkristalle sind zumeist Zwillingsbildungen nach folgenden Gesetzen:

1. Zwei rechte oder zwei linke Individuen sind derart miteinander verwachsen, daß die dreizählige vertikale Symmetrieachse für den Zwilling zugleich eine zweizählige, also für den Kristall auch eine sechszählige Symmetrieachse ist (Fig. 14).

2. Ein rechtes und ein linkes Individuum liegen symmetrisch zu den Ebenen, die durch die Vertikalachse gehen und auf den Prismenflächen a senkrecht stehen (Fig. 15).

Nicht selten werden Vierlinge beobachtet, in denen zwei Individuen nach dem ersten, die beiden anderen nach dem zweiten Zwillingsgesetz miteinander verbunden sind.

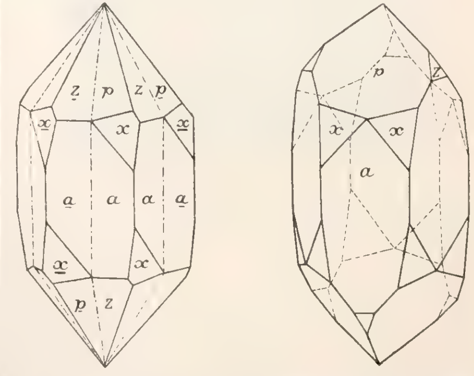


Fig. 14. Durchdringungszwilling von zwei rechten Kristallen. Fig. 15. Durchdringungszwilling eines rechten und eines linken Kristalls. Quarz.

Die Erkennung von Zwillingsbildungen ist bei Vorhandensein der Flächen x mit bloßem Auge möglich. Sonst dienen hier-

zu die Aetzfiguren, die Interferenzerscheinungen im polarisierten Licht, sowie die pyroelektrischen Erscheinungen.

Optisch einachsig, aktiv, mit schwacher Doppelbrechung positiven Charakters. Die Vertikalachse ist optisch eine unendlichzählige Symmetrieachse und jede zur Vertikalachse senkrechte Gerade eine zweizählige Symmetrieachse.

Da die Geschwindigkeit e des außerordentlichen Strahles kleiner ist als die Geschwindigkeit o des ordentlichen Strahles, so liegt das Rotationsellipsoid der Huygensschen Strahlenfläche (vgl. Kalkspat) innerhalb der Kugel. Es tritt ferner insofern eine Abweichung vom Huygensschen Gesetz auf, als die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des ordentlichen Strahles nicht konstant ist, sondern in Richtung der optischen Achse ein Maximum besitzt. Dagegen ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des außerordentlichen Strahles in der Umgebung der optischen Achse kleiner als es dem Huygensschen Gesetz entsprechen würde. Daraus folgt, daß die Strahlenfläche des Quarzes von derjenigen der inaktiven positiven einachsigen Kristalle insofern abweicht, als in der Umgebung der optischen Achse die Kugel der Huygensschen Strahlenfläche etwas nach außen hin erweitert, das Rotationsellipsoid dagegen etwas nach innen abgeplattet erscheint (V. v. Lang, Fig. 16). Quarz ist demnach auch in der Richtung der optischen Achse doppelbrechend. Allerdings ist der Betrag dieser Doppelbrechung im Bereiche des sichtbaren Spektrums kaum 0,00001. Mit Hilfe eines dreifachen Quarzprismas nach A. Fresnel läßt sich sowohl die Existenz der beiden Strahlen in Richtung der Vertikalachse nachweisen, wie auch zeigen, daß die eine Welle rechts-, die andere linkszirkular polarisiert ist. Dem Sinn der gewendeten Form entspricht auch der Sinn der schnelleren dieser beiden zirkularpolarisierten Wellen. Daher zeigt infolge der Superposition beider Wellen Rechtsquarz rechtes, Linksquarz linkes optisches Drehvermögen. Die Drehung der Polarisationsebene ist proportional der Plattendicke. Für eine Platte von 1 mm Dicke hat bei einer Temperatur von 20° C der Drehungswinkel folgende Werte:

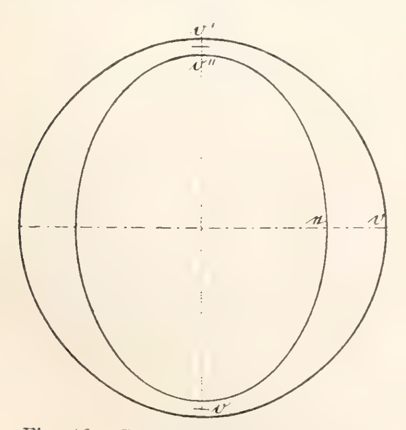


Fig. 16. Strahlenfläche des Quarzes.

	Wellenlänge in μ	Drehungswinkel	Beobachter
	0,2144	235,972°	J. L. Soret u. S. Sarasin
	0,3180	84,982	,, ,,
	0,3934	52,155	,, ,,
F	0,4861	32,761	,, ,,
E	0,527	27,540	,, ,,
D_2	0,5890	21,725	,, ,,
D_1	0,5896	21,690	,, ,,
C	0,6563	17,312	,, ,,
A	0,7605	12,648	,, ,,
	0,810	11,11	R. Dongier
	0,940	8,14	,,
	1,170	5,18	,,
	1,744	2,22	,,
	2,200	1,66	,,

Mit abnehmender Wellenlänge wächst also der Drehungswinkel der Polarisationsebene sehr rasch (Fig. 17). Einer Temperaturerhöhung um 1° C entspricht im Bereiche des sichtbaren Spektrums eine Zunahme des Drehungswinkels um annähernd 0,002°.

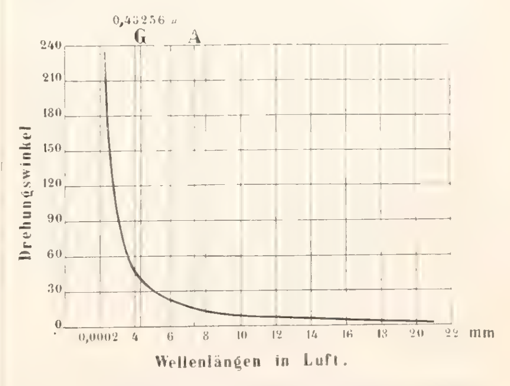


Fig. 17. Quarz. Dispersion des optischen Drehungsvermögens für eine Plattendicke von 1 mm.

Mit der Neigung der Fortpflanzungsrichtung der Strahlen gegen die Vertikalachse ist ein kontinuierlicher Ueber-

gang von der Zirkularpolarisation zur gradlinigen Polarisation durch elliptische Polarisationszustände vorhanden. Allein schon bei Fortpflanzungsrichtungen, die zirka 25° gegen die optische Achse geneigt sind, läßt sich eine Abweichung von der Huygensschen Strahlenfläche durch Messungen nicht mehr feststellen.

Bei der Bestimmung der Hauptbrechungsindizes $\omega = 1/o$ und $\varepsilon = 1/e$ mit Hilfe eines Prismas, dessen brechende Kante parallel zur optischen Achse liegt, ist infolge des positiven Charakters der Doppelbrechung die stärker abgelenkte Welle im Gegensatz zum Kalkspat senkrecht zur Kante des Prismas polarisiert, also eine außerordentliche Welle (Fig. 6 und 8). Die folgende Tabelle gibt eine Auswahl der Bestimmungen von ω und ε (vgl. Fig. 1).

Wellenlänge in μ	ω	ε	$\varepsilon - \omega$	Beobachter
0,185	1,6750	1,6891	0,0141	E. Sarasin
0,257	1,59624	1,60713	0,01089	,,
0,361	1,56348	1,57319	0,00971	,,
h 0,410	1,55650	1,56604	0,00954	J. Macé de Lépinay
G′ 0,433	1,55413	1,56357	0,00944	bei 15° C
F 0,486	1,54969	1,55899	0,00930	,,
E 0,527	1,54717	1,55640	0,00923	,,
D 0,589	1,54425	1,55336	0,00911	,,
C 0,656	1,54190	1,55093	0,00903	,,
A 0,761	1,53919	1,54813	0,00894	,,
0,867	1,53712	1,54598	0,00886	E. Carvallo
1,159	1,53283	1,54152	0,00869	,,
2,84	1,5039			H. Rubens
4,20	1,4569			,,
5,8	1,368			E. F. Nichols
7,0	1,167			,,
51,2	2,46			H. Rubens und
56,0	2,18			E. Aschkinaß
61,1	2,12			,,

Bei einer Temperaturerhöhung um 1° C nehmen die Brechungsindizes um ungefähr eine halbe Einheit der fünften Dezimale ab. Die Werte $\varepsilon - \omega$ ändern sich mit der Temperatur nur außerordentlich wenig; bei einer Temperaturerhöhung um 10° C nimmt $\varepsilon - \omega$ erst um annähernd eine Einheit der fünften Dezimale ab (J. Macé de Lépinay).

Der Betrag der Doppelbrechung im Bereiche des sichtbaren Spektrums ist ungefähr neunzehnmal kleiner als für Kalkspat und ändert sich außerdem nur relativ wenig mit der Wellenlänge des Lichts (Fig. 10). Für die mittlere Dispersion C bis F und den reziproken Wert ν der relativen Dispersion (vgl. Flußspat) ergeben sich folgende Werte:

	O	E
Mittlere Dispersion C bis F:	0,00779	0,00806
ν:	69,9	68,7

Im Gegensatz zum Kalkspat haben die Brechungsindizes für den ordentlichen und außerordentlichen Strahl nahezu die gleiche Dispersion. Die für die Linsenpraxis wichtige Größe ν ist erheblich kleiner als für Flußspat.

Absorption ist im Ultraviolett bei 0,103 μ berechnet worden. Die Versuche zeigen, daß Quarz für Strahlen von der Wellenlänge 0,185 μ noch gut durchlässig ist. Im Ultrarot wird Quarz für beide Strahlen von 4,75 μ an undurchlässig (E. Merritt). In diesem Gebiete des Spektrums folgen eine größere Reihe von Absorptionsstreifen rasch aufeinander (W. Coblentz). Metallische Reflexion ist im Ultrarot bei 8,50 μ, 9,02 μ und 20,75 μ (Reststrahlenmethode von H. Rubens und E. Aschkinaß) und außerdem bei 12,5 (W. Coblentz) beobachtet worden. Für Strahlen von sehr großer Wellenlänge in dem Bereiche von zirka 50 μ bis 60 μ wird Quarz wieder durchsichtig, so daß für die Bestimmung der Brechungsindizes in diesem Gebiete wieder die Prismenmethode anwendbar ist (H. Rubens und E. Aschkinaß).

Hauptdielektrizitätskonstanten in Richtung der Vertikalachse: 4,60, senkrecht dazu: 4,34 (H. W. Schmidt).

Interferenzerscheinungen im polarisierten Licht: Im konvergenten polarisierten Licht unterscheidet sich das Interferenzbild einer zur optischen Achse senkrechten Quarzplatte zwischen gekreuzten Polarisationsprismen von dem

eines inaktiven einachsigen Kristalls (vgl. Fig. 11) dadurch, daß bei größerer Plattendicke die schwarzen Balken, welche die Hauptschnitte der Polarsationsprismen andeuten, nicht bis in die Mitte des Gesichtsfeldes reichen (Fig. 18). Diese erscheint dann bei Beleuchtung mit weißem Licht in einer von der Plattendicke und der Stellung des

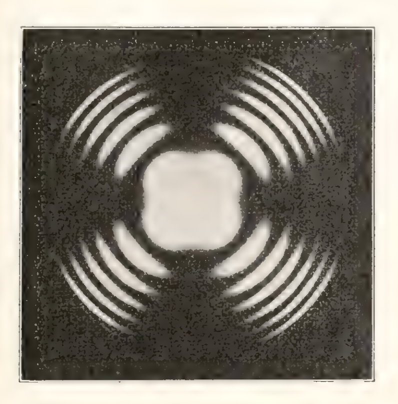


Fig. 18. Quarz. Platte senkrecht zur optischen Achse im einfarbigen konvergenten polarisierten Licht zwischen gekreuzten Polarisationsprismen.

Analysators abhängigen Interferenzfarbe erhellt. Dreht man den Analysator, so zerfällt jeder dunkle Hauptkreis (im einfarbigen Licht) oder jeder isochromatische Ring (im weißen Licht) in vier Bogenstücke, die sich erweitern oder verengen, je nachdem jene Drehung im Sinne des Drehungsvermögens der Platte oder in dem entgegengesetzten Sinne erfolgt. Zwei gleich dicke Platten von Rechts- und Linksquarz übereinander zeigen im konvergenten polarisierten Licht die zuerst von G. B. Airy beobachteten vierfachen Spiralen (Fig. 19 und 20). Sind diese nach rechts gewunden, so liegt dem Polarisator zunächst ein Rechtsquarz, sonst umgekehrt. Man kann die Spiralen schon an einer einfachen Quarzplatte beobachten, wenn man diese auf den horizontalen Beleuchtungsspiegel eines Nörrenbergschen Polarisationsapparates legt.

Im parallelstrahligen polarisierten weißen Licht hellt eine zur optischen Achse senkrechte Platte infolge der Drehung der Polarisationsebene zwischen gekreuzten Polarisationsprismen das Gesichtsfeld in einer von der Plattendicke abhängigen Farbe auf. Ist beim Drehen des Analysators nach rechts die Aufeinanderfolge der Interferenzfarben Rot, Gelb, Violett, so ist der vorliegende Quarz ein rechter Kristall; ist bei der nämlichen Drehung des Analysators die Aufeinanderfolge Violett, Gelb, Rot, so gehört die Quarzplatte einem linken Kristall an (Erkennung von Zwillingen nach dem zweiten Gesetz). Ueber das Verhalten beliebig geschnittener Platten vgl. den Abschnitt „Kalkspat".

Infolge der geringen Dispersion der Doppelbrechung treten an einem parallel der optischen Achse geschnittenen Quarzkeil zwischen gekreuzten Polarisationsprismen im weißen Licht Interferenzfarben auf, die sehr nahe den Newtonschen, an einer keilförmigen Luftschicht im reflektierten Licht entstehenden Farben entsprechen. Im einfarbigen Licht tritt an allen denjenigen Stellen ein dunkler Streifen auf, wo der Gangunterschied ein ganzes Vielfaches der Wellenlänge des benutzten Lichtes ist. In den vier Diagonalstellungen, in denen die Polarisationsrichtungen im Kristall den Winkel zwischen Polarisator- und Analysatorhauptschnitt halbieren, treten diese Interferenzstreifen am deutlichsten hervor.

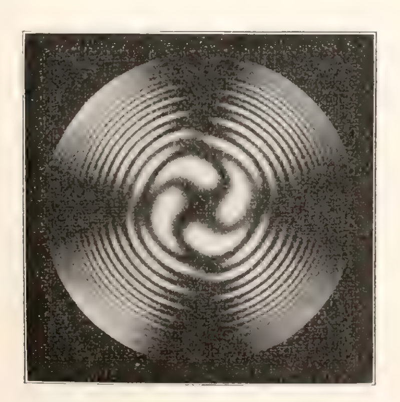




Fig. 19. Eine rechtsdrehende Platte über einer linksdrehenden. Fig. 20. Eine linksdrehende Platte über einer rechtsdrehenden. Quarz. Vierfache Airysche Spiralen.

Zur Unterscheidung einfacher Kristalle

von Zwillingen sowie rechter und linker Kristalle sind auch die piezo- und pyroelektrischen Erscheinungen sehr geeignet. Das Bestäubungsverfahren von A. Kundt mit Hilfe von Schwefel und Mennige läßt an einem stark komprimierten oder bis etwa 50° erwärmten und dann der Abkühlung überlassenen Quarzkristall die dem Symmetriecharakter entsprechende elektrische Verteilung erkennen.

Von Lumineszenzerscheinungen zeigt Quarz glänzende gelbe Tribophosphoreszenz (W. G. Levison).

Der bei niederer Temperatur stabile α-Quarz erfährt bei der Erwärmung eine umkehrbare Umwandlung in eine andere Modifikation. Die Umwandlungstemperatur liegt bei 575°±2° C (optische Untersuchungen von F. E. Wright und E. S. Larsen). Der β-Quarz ist durch eine geringere Dichte, plötzliche Abnahme in der Doppelbrechung und eine geringere Zunahme des optischen Drehungsvermögens mit der Temperatur gekennzeichnet (E. Mallard und H. le Chatelier) und ist hexagonal - trapezoedrisch - hemiedrisch (G. Friedel und O. Mügge). Man kennt noch vier weitere Modifikationen von SiO_2: α- und β-Tridymit, so genannt nach ihren charakteristischen Drillingsverwachsungen, unterhalb 130° C wahrscheinlich rhombisch, über 130° C hexagonal; α- und β-Cristobalit, unterhalb 175° C tetragonal, oberhalb 175° regulär.

Während der Erhitzung wandelt sich Quarz bei etwa 1450 bis 1470° C in den amorph-isotropen Zustand um (K. Endell). Die beginnende Erweichung macht sich erst bei Temperaturen über 1600° C bemerkbar. Zur Herstellung von flüssigem Quarzglas sind Temperaturen von mindestens 1800 bis 2000° C erforderlich. Das aus diesem Schmelzfluß glasig erstarrte SiO_2 (Quarzglas von W. C. Heräus) ist schwächer brechend, aber für ultra-violettes Licht ebenso durchsichtig wie α-Quarz. J. W. Gifford ermittelte für Quarzglas folgende Brechungsindizes:

Wellenlänge in μ	Brechungsindex
Hg 0,4046	1,469676
Hg 0,4359	1,466741
Cd 0,4800	1,463571
Cd 0,5086	1,461903
Hg 0,5461	1,460155
Cd 0,6438	1,456771
Li 0,6708	1,456072

Auch die mittlere Dispersion C bis F ist geringer als für die beiden Strahlen im Quarz, denn für Quarzglas beträgt sie 0,00676. Das Quarzglas ist ausgezeichnet durch einen sehr kleinen Ausdehnungskoeffizienten und verhältnismäßig große Wärmeleitfähigkeit, woraus seine einzig dastehende Widerstandsfähigkeit gegen plötzlichen Temperaturwechsel abzuleiten ist. Entglasungen des Quarzglases bestehen nach A. Lacroix aus Cristobalit. Dagegen entglast das bei der niederen Temperatur erhaltene amorph-isotrope SiO_2 zu Tridymit (P. J. Holmquist.

Anwendung. Infolge seiner hohen Durchlässigkeit für Strahlen kurzer Wellenlänge wird das Quarzglas zur Herstellung von Linsen, Prismen, Objektträgern usw. für Untersuchungen im ultravioletten Licht verwandt. Mit Hilfe von Quarzglasmonochromaten, die als homogene Immersionen mit einer Apertur von 1,30 hergestellt sind, ist es A. Köhler gelungen, im einfarbigen Licht von der Wellenlänge $\lambda = 0{,}275\ \mu$ des Funkens zwischen Cadmiumelektroden das Auflösungsvermögen bei mikrophotographischen Aufnahmen auf 0,106 μ zu erhöhen. Im kristallinen Zustande findet Quarz bei kristalloptischen Bestimmungen eine ausgedehnte Verwendung. Quarzkeile, deren brechende Kanten parallel der optischen Achse verlaufen, werden, da an ihnen im weißen polarisierten Licht die Reihenfolge der Interferenzfarben sehr nahe der Newtonschen Farbenskala entspricht, dazu benutzt, die Ordnung der Interferenzfarben von Kristallplatten und Mineraldünnschliffen, also auch deren Dicke zu bestimmen. Dieselben Keile werden in Additions- oder Subtraktionslage dazu verwandt, die Polarisationsrichtungen der schnellerenen und langsameren Welle in Kristalldurchschnitten voneinander zu unterscheiden. Die Kombination zweier Quarzkeile im Babinetschen Kompensator dient zur Messung von Gangunterschieden und somit bei bekannter Dicke der untersuchten Kristallplatten zur Bestimmung der Größe der Doppelbrechung. Analog der Kalkspatdoppelplatte nach L. Calderon werden auch künstliche Halbschattenplatten aus zwei parallel der Vertikalachse geschnittenen Quarzplatten hergestellt. Doch sind für genauere stauroskopische Messungen Halbschattenplatten vorzuziehen, die aus zwei nebeneinander gekitteten senkrecht zur optischen Achse geschnittenen Quarzplatten von gleicher Dicke, aber entgegengesetztem Drehungsvermögen bestehen. Da die Drehung der Polarisationsebene von der Plattendicke abhängt, so kann man bei Anwendung schwach keilförmiger Halbschattenplatten (J. Macé de Lépinay, Doppelquarzkeilplatte nach F. E. Wright) den Halbschattenwinkel während der Messung nach Belieben ändern.

4. Turmalin. Mischungen von $H_8Na_4Al_{16}B_6Si_{12}O_{63}$, $H_6Mg_{12}Al_{10}B_6Si_{12}O_{63}$, H_6Fe_{12}

$Al_{10}B_6Si_{12}O_{63}$ mit wechselndem Ersatz von Na durch Li und K, von Fe durch Mn, selten von Al durch Cr, auch mit geringen Mengen von Ca und F (nach E. A. Wülfing).

Nebengemengteil in den Tiefengesteinen der Granit-, Syenit- und Dioritfamilie, besonders an deren peripheren Teilen und in der Nachbarschaft von Gängen und Klüften. Sehr verbreitet in Pegmatiten. Vielfach in den Kontakthöfen der Tiefengesteine. Diese Art des Vorkommens sowie der B- und F-Gehalt lassen auf pneumatolytische Bildung schließen.

Die farblosen oder blaßgelb, rot und grün gefärbten Kristalle sind Alkaliturmaline. Mit zunehmendem Gehalt an Mg wird die Färbung intensiver grün, blau oder braun. Die Fe-reichen Kristalle sind schwarz und nur in geringem Grade durchscheinend.

Spezifisches Gewicht 3,0 bis 3,2. Härte 7 bis 7½.

Allgemeinste einfache Form: Ditrigonale Pyramide. a:c mit der chemischen Zusammensetzung veränderlich, z. B. 1 : 0,4480. Die Vertikalachse ist eine polare dreizählige Symmetrieachse. In ihr schneiden sich drei gleichberechtigte Symmetrieebenen.

Gewöhnlich prismatisch ausgebildet. Am häufigsten treten auf das hexagonale Prisma b (11$\bar{2}$0) und die trigonalen Prismen a (10$\bar{1}$0) und a' (01$\bar{1}$0). Zuweilen ist nur ein trigonales Prisma vorhanden. Stets bedingt die relative Ausdehnung der Prismenflächen einen charakteristischen trisymmetrischen Querschnitt.

Die Enden der polaren Vertikalachse werden nach dem pyroelektrischen Verhalten bezeichnet. An dem analogen Pole stimmt das algebraische Vorzeichen der Temperaturänderung überein mit dem Vorzeichen der dadurch erregten Elektrizität (Fig. 21). An dem antilogen Pole sind diese Vorzeichen entgegengesetzt. Am antilogen Pole beobachtet man die trigonalen Pyramiden p (10$\bar{1}$1), o (02$\bar{2}$1) und die ditrigonale Pyramide t (21$\bar{3}$1), am analogen Pole dagegen die trigonalen Pyramiden p' (1$\bar{1}$11), n (10$\bar{1}$2) und die Basis (000$\bar{1}$).

Fig. 21. Turmalin.

Geschmolzenes Kaliumhydroxyd ruft auf den Flächen des hexagonalen Prismas b asymmetrische Aetzeindrücke von dreiseitigem Umriß hervor, deren kürzeste Seiten dem analogen Pole zugewandt sind.

Optisch einachsig von negativem Charakter der Doppelbrechung. Die Strahlenfläche entspricht also der des Kalkspats. Die Abhängigkeit der Hauptbrechungsindizes und ihrer Differenz von der chemischen Zusammensetzung zeigen folgende Werte für das Licht der D-Linie (E. A. Wülfing).

	Li-Turmalin	Mg-Turmalin
ω:	1,6406—1,6507	1,6315—1,6536
ε:	1,6199 –1,6257	1,6123—1,6290
ω—ε:	0,0172—0,0211	0,0192—0,0246
spez. Gew.:	3,007 — 3,134	3,036 —3,104

	Blauschwarzer Fe-Turmalin	Grünschwarzer Fe-Turmalin
ω:	1,6517—1,6664	1,6531—1,6854
ε:	1,6281—1,6368	1,6270—1,6515
ω—ε:	0,0236—0,0299	0,0260—0,0339
spez. Gew.:	3,140 —3.212	3.122 —3.220

Die eisenreichen Turmaline besitzen demnach die höchsten Werte der Licht- und Doppelbrechung.

Für die Dispersion der Hauptbrechungsindizes fand J. Ehlers an einem grünen Turmalin von Brasilien:

Wellenlänge in μ	ω	ε	ω—ε
F 0,486	1,6533	1,6325	0,0208
E 0,527	1,6500	1,6293	0,0207
0,559	1,6478	1,6273	0,0205
D 0,589	1,6461	1,6256	0,0205
C 0,656	1,6429	1,6225	0,0204
B 0,687	1,6420	1,6217	0,0203

Die Hauptdielektrizitätskonstanten sind 7,13 senkrecht zur Achse, 6,54 parallel zur Achse (R. Fellinger).

Im Ultrarot sind für beide Strahlen bei 1,28 μ und 2,82 μ starke Absorptionsbanden vorhanden (E. Merritt). Metallische Reflexion ist in dem Gebiete von 7,45 μ bis 10,8 μ an fünf kurz aufeinanderfolgenden Stellen beobachtet worden (W. Coblentz).

Relativ stark ist der Pleochroismus der stärker gefärbten Turmaline: Läßt man auf gleich dicke, aber verschieden orientiert geschnittene Platten eines dunkelgrünen Kristalls natürliches weißes Licht senkrecht einfallen, so erscheint das austretende Licht verschieden gefärbt Die Absorption der außerordentlichen Welle ändert sich nämlich mit der Fortpflanzungsrichtung und ist ein Minimum in den zur Vertikalachse senkrechten Richtungen. Der Pleochroismus ist an stark gefärbten Turmalinkristallen deshalb so gut wahrnehmbar, weil

die ordentliche Welle in diesen sehr stark, bei einer Plattendicke von 1 bis 2 mm fast vollständig absorbiert wird. Man erkennt dies, wenn man die Platte über einem Polarisationsprisma in ihrer Ebene so weit dreht, bis die Polarisationsebene der ordentlichen Welle mit der des eintretenden Lichtes zusammenfällt. Zur bequemeren Vergleichung der Farben der ordentlichen und außerordentlichen Welle von gemeinsamer Fortpflanzungsrichtung kann man sich eines Dichroskops nach W. Haidinger bedienen. Spektralphotometrische Absorptionsmessungen sind von J. Ehlers ausgeführt worden.

Die pyroelektrische Erregung der Turmaline ist von der chemischen Zusammensetzung abhängig. Rote, grüne und braune Kristalle entwickeln unter gleichen Bedingungen bei Erwärmung oder Abkühlung bedeutend größere Elektrizitätsmengen als schwarze Turmaline. Dabei ist bei einer bestimmten Temperaturänderung die entwickelte Elektrizitätsmenge unabhängig von der Zeit, innerhalb deren sich die Temperaturänderung vollzieht, ferner unabhängig von der Länge des Kristalls, aber proportional seinem Querschnitt (J. M. Gaugain). Mehrere Turmaline von demselben Querschnitt hintereinander geschaltet und mit den ungleichnamigen Polen verbunden liefern die gleiche Elektrizitätsmenge wie ein einfacher Kristall. Dagegen liefert die Batterie einer beliebigen Anzahl mit ihren gleichnamigen Polen verbundener Kristalle eine Elektrizitätsmenge, die gleich der Summe der durch die Kristalle einzeln erzeugbaren Elektrizitätsmengen ist. Zur Erklärung dieser Tatsache hat W. Thomson die Hypothese aufgestellt, daß ein Turmalinkristall sich in seinem Innern dauernd in einem Zustande gleichförmiger dielektrischer Polarisation befinde. Die Folgerungen aus dieser Hypothese wurden von E. Riecke bestätigt gefunden.

Das Vorzeichen der durch Druck in Richtung der Vertikalachse an den beiden Polen entstehenden Piezoelektrizität entspricht dem Vorzeichen der bei der Abkühlung auftretenden elektrischen Erregung (J. und P. Curie).

Anwendung: Infolge der stärkeren Absorption des ordentlichen Strahles können Platten parallel zur optischen Achse aus farbigen Kristallen, wenn die durch sie bewirkte Färbung des Gesichtsfeldes nicht in Betracht kommt, als geradlinig polarisierende oder analysierende Vorrichtungen dienen. Das ist z. B. der Fall bei der Beobachtung von Gegenständen, die hinter einer durchsichtigen, aber reflektierenden Fläche (Wasserfläche, Glasplatte) liegen. Das durch Reflexion polarisierte Licht kann in diesem Falle ausgelöscht werden, wenn man durch eine in richtiger Lage gehaltene Turmalinplatte hindurchblickt (D. F. J. Arago). Die Verbindung einer solchen Turmalinplatte mit einer Kristallplatte, die ein charakteristisches Interferenzbild hervorruft, wird benutzt als Polariskop, z. B. zur Untersuchung der atmosphärischen Polarisation. Man erhält ein Polarisationsinstrument für schwach konvergentes Licht, wenn man zwei derartige hintereinandergestellte Turmalinplatten dicht vor das Auge hält (Turmalinzange). Ferner benutzt man eine stärker gefärbte Turmalinplatte als Analysator bei der Photographie von Interferenzerscheinungen im stark konvergenten einfarbigen Licht um den Astigmatismus der Interferenzbilder zu vermeiden, den ein Analysator aus Kalkspatprismen bewirken würde.

Literatur. ***F. Auerbach,*** *Das Zeißwerk usw. Jena 1907.* — ***H. Dufet,*** *Recueil de Données Numériques. II. Bd. Paris 1899.* — ***C. Hintze,*** *Handbuch der Mineralogie. Leipzig 1889.* — ***H. Kayser,*** *Handbuch der Spektroskopie. IV. Bd. Leipzig 1908.* — ***Th. Liebisch,*** *Grundriß der physikalischen Kristallographie. Leipzig 1896.* — ***G. Linck,*** *Grundriß der Kristallographie. Jena 1908.* — *Müller-Pouillets Lehrbuch der Physik, II. Bd.* ***O. Lummer,*** *Optik 1 und 2. Braunschweig 1907 und 1909.* — ***F. Pockels,*** *Lehrbuch der Kristalloptik. Leipzig und Berlin 1906.* — ***H. Rosenbusch und E. A. Wülfing,*** *Mikroskopische Physiographie usw. I. Bd. 2. Stuttgart 1905.* — ***W. Voigt,*** *Lehrbuch der Kristallphysik. Leipzig und Berlin 1910.*

M. Berek.

Mineralien.

Außer den vorhergehenden Artikeln vergleiche noch folgende: „Aluminiummineralien“, „Bormineralien“, „Düngemittel, Mineralische Düngemittel“, „Erden, Mineralien mit Seltene Erden“, „Erzlagerstätten“, „Radiummineralien“, „Salzlagerstätten“, „Schmucksteine“, „Schwerspatgruppe“, „Silikate“, „Wolframmmineralien“, „Zeolitte“.

Mineralogie.

Mineralogie ist die Wissenschaft, die sich mit den Mineralien beschäftigt. Als Mineral bezeichnet man jedes in der Natur (gediegen) vorkommende Element und jede dort vorkommende chemische Verbindung von Elementen, nicht aber Gemenge irgendwelcher Art. Man kennt z. Z. gegen tausend Mineralien, von denen weitaus die meisten kristallisiert sind. In größerer Menge kommen nur wenige hundert vor.

Die Mineralogie als Wissenschaft untersucht die Eigenschaften der Mineralien (Physiographie), ihr Vorkommen und Zu-

sammenvorkommen (Paragenesis), ihre Entstehung (Genesis), ihr chemisches Verhalten (Mineralchemie), ihre künstliche Darstellung (experimentelle Mineralogie), ihre Umwandelung (Metamorphose) und ihre Zersetzung (Verwitterung). Der Endzweck ist die Erkenntnis der Gesetze des Naturgeschehens.

Die Mineralogie ist von großer Bedeutung für den Bergbau, für die mit anorganischen Stoffen beschäftigte Technik und neben der Paläontologie die grundlegende Wissenschaft für die Geologie. Ihre Hilfswissenschaften sind vor allem Physik und Chemie; mit der Geologie aber ist die Mineralogie untrennbar verknüpft.

Die Mineralogie ist in ihrer ersten Entwickelung wesentlich ein Kind des deutschen Bergbaus. Das Wort Mineral leitet sich ab von dem lateinischen mina (Schacht) und dieses von dem mittellateinischen menare (betreiben). Das Wort Mineralogie ist schon bei den Arabern des frühen Mittelalters im Gebrauch (Avicenna 980 bis 1036). Ums Jahr 1500 erscheint die erste Mineralogie, das deutsch geschriebene, wahrscheinlich von Basilius Valentin herausgegebene „Bergbüchlein". Ihm folgen zahlreiche andere Bücher über Mineralogie, in denen aber noch alles Mögliche abgehandelt wird, was heute nicht mehr zur Mineralogie gehört. Erst um die Mitte des 18. Jahrh. wird die Trennung von der Kristallographie (s. d.). der Paläontologie (s. d.) und der Geologie eingeleitet. A. G. Werner (Freiberg; 1750 bis 1815) lehrte die Mineralogie unter dem Namen „Oryktognosie" (ὀρυκτά, Steine) und legte den Grund für die Abzweigung der Petrographie.

Zuerst ist die Mineralogie rein beschreibende Wissenschaft; zu Werners Zeiten greift eine naturhistorische Auffassung Platz, während gleichzeitig mit der Entwickelung der quantitativen chemischen Analyse die Systematik eine mehr und mehr chemische wird. Diese chemische Auffassung erlangt um die Mitte des vergangenen Jahrhunderts den Sieg. Erst in neuerer Zeit mit dem gewaltigen Aufschwunge der Petrographie macht sie wieder einer mehr naturhistorischen Betrachtungsweise (Vorkommen und Paragenesis, Entstehung und Metamorphose) Platz und die Anwendung der physiko-chemischen Methoden und Experimente geben der jetzigen Mineralogie ein ganz neues Gepräge.

Literatur. *Lehrbücher: vgl. den Artikel „Gesteinsbildende Mineralien". — Handbücher:* ***J. D. Dana****, A System of Mineralogy. New York 1893. —* ***C. Hintze****, Handbuch der M. Leipzig 1897. —* ***P. Groth****, Tabellarische Uebersicht der M. Braunschweig 1898. —* ***C. Dölter****, Handbuch der Mineralchemie. Dresden 1911. — Geschichte:* ***F. v. Kobell****, Geschichte der M. von 1650 bis 1860. München 1864. —* ***K. A. v. Zittel****, Geschichte der Geologie und Paläontologie bis Ende des 19. Jahrh. München und Leipzig 1899.*

G. Linck.

Mißbildungen.

1. Allgemeiner Teil: a) Definition und Allgemeines über Mißbildungen. b) Einteilung. c) Allgemeines über Anatomie und Physiologie der Mißbildungen. d) Vorkommen der Mißbildungen. e) Genese: α) Formale Genese. Entstehungszeit. Teratogenetische Terminationsperiode. Hemmungsbildungen u. ä. β) Kausale Genese. Amniogene Mißbildungen. f) Regeneration und Mißbildung. g) Mißbildung und Vererbung. h) Experimentelle Teratologie. 2. Doppelbildungen: a) Allgemeines. b) Einteilung. c) Genese: α) Formale Genese. β) Kausale Genese. d) Hauptformen der Doppelbildungen. 3. Einzelmißbildungen: a) Mißbildungen der äußeren Form. b) Mißbildungen der einzelnen Organe und Organsysteme. 4. Anhang. Bemerkungen über Mißbildungen der Wirbellosen und der Pflanzen.

1. Allgemeiner Teil. a) Definition und Allgemeines über Mißbildungen. — Mißbildung ist eine während der fetalen Entwickelung zustandegekommene, also angeborene, Veränderung der Form eines oder mehrerer Organe oder Organsysteme oder des ganzen Körpers, welche außerhalb der Variationsbreite der Spezies gelegen ist. Diese von mir gegebene Definition der Mißbildungen entspricht wohl am besten dem allgemein angenommenen Standpunkt über die Abgrenzung der Mißbildungen. Es verzichtet diese Begriffsbestimmung auf eine Unterscheidung von Anomalie und Mißbildung. Die Abgrenzung gegen Variation kann nur durch Erforschung der Variationsbreite gegeben werden. Oft läßt sich eine sichere Abgrenzung gegen die Variation nicht finden, so auf dem Gebiet des Gefäßsystems. Eine Bezeichnung der „schweren Mißbildungen" als Monstra, Monstrositäten ist wissenschaftlich überflüssig. Unsere Definition nimmt die Geburt als teratogenetische Terminationsperiode an. Sie gibt damit kund, daß sie vom Standpunkt der menschlichen Medizin aufgestellt wurde und die Wirbeltiere, in erster Linie die Säugetiere, berücksichtigt. Es gibt aber auch beim Menschen und den Säugetieren postembryonale Mißbildungen, insofern auch beim Säugetier die Entwickelung nicht mit der Geburt aufhört.

Mißbildung ist das Resultat einer Entwickelungsstörung. Das ist eine zweite zu Recht bestehende Definition. Dabei müssen wir „Entwickelungsstörung" im weiteren Sinne fassen, insofern alle Wachstumsvorgänge zur Entwickelung gerechnet werden müssen. Mißbildung ist ein Dauerzustand, abnorme Entwickelung, abnormes Wachstum führt zur Mißbildung. Da Regeneration ein Teil des Wachstums ist, so verstehen wir, daß abnorme Regeneration

zu Mißbildungen führen kann. Tatsächlich sind regenerative Mißbildungen sehr verbreitet. Die Definition der Mißbildungen als Resultat von Entwickelungs- und Wachstumsstörungen erlaubt die Ausdehnung unserer Begriffsbestimmung auf die Wirbellosen, leistet zu gleicher Zeit aber auch bei der Analyse der postembryonalen pathologischen Vorgänge des Menschen und der Tiere gute Dienste. Hier ist es vor allem das Gebiet der Geschwülste, das durch die Mißbildungslehre in mancher Beziehung geklärt wird. Aber auch bei regenerativen Vorgängen, wie solche bei der Entzündung und Wundheilung auch bei den höchsten Wirbeltieren weit verbreitet und wichtig sind, vermag eine feinere Analyse Abweichungen von dem gewöhnlichen Vorgang nicht selten zu erkennen, so könnten manche abnormen Bildungen nach chronischen Entzündungen mit Mißbildungen verglichen werden.

Im folgenden sollen die Mißbildungen des Menschen und der Wirbeltiere als am besten erforscht, der Darstellung zugrunde gelegt werden, doch wird sich Gelegenheit zum Hinweis auf die wirbellosen Tiere wiederholt ergeben.

1b) Einteilung. Ich werde der Einteilung in meinem Lehr- und Handbuch der Mißbildungslehre folgend, zuerst einen kurzen allgemeinen Ueberblick geben, danach die Doppelbildungen (und Mehrfachbildungen), weiterhin die Einzelmißbildungen behandeln. Die Einzelmißbildungen werden eingeteilt in Mißbildungen der äußeren Form und Mißbildungen der einzelnen Organe.

Die Mißbildungslehre hat engste Beziehungen zu den verschiedensten Zweigen der Biologie und der Medizin. Hier sei insbesondere auf den engen Zusammenhang der Teratologie und Entwickelungsmechanik hingewiesen. Das wird aus der Darlegung der experimentellen Teratologie hervorgehen.

1c) Allgemeines über Anatomie und Physiologie der Mißbildungen. Allgemeines über Anatomie der Mißbildungen läßt sich nur insofern aussagen, als eine anatomisch nachweisbare Aenderung des Baues bei jeder Mißbildung vorhanden sein muß. Man hat allerdings auch den Gedanken ausgesprochen, daß es sozusagen biochemische Mißbildungen gäbe und hat Anomalien der Konstitution mit derartigen biochemischen Mißbildungen in Zusammenhang bringen wollen; doch fehlen zunächst noch die Grundlagen zu einem weiteren Ausbau in dieser Richtung. Daß entsprechend der Anomalie des Baues auch die Funktion bei Mißbildungen in der Regel beeinflußt ist, daß die Physiologie der Mißbildung eine andere ist, als die Physiologie des Normalen, liegt auf der Hand.

Freilich geht es nicht an, wie von verschiedenen Seiten versucht wurde, die Funktionsstörung als Charakteristikum der Mißbildung hinzustellen, danach eine Grenze von Anomalie und Mißbildung zu ziehen. Selbst der Defekt einer ganzen Lunge oder Niere kann ohne Funktionsstörung für den Gesamtorganismus ertragen werden, und niemand wird in Abrede stellen, daß diese Defekte zu den Mißbildungen zu rechnen sind.

1d) Vorkommen der Mißbildungen. Was das Vorkommen der Mißbildungen betrifft, so versteht es sich, daß die Mißbildungen des Menschen und der Haussäugetiere am besten gekannt sind. Es steht jedoch fest, daß keine Tierklasse oder Ordnung von Mißbildungen verschont ist, das versteht sich nach unserer Definition. Je genauer eine Tierart bekannt wird, desto besser lernen wir auch die Mißbildungsformen derselben kennen. Vergleichbar sind zunächst nur die Mißbildungen innerhalb einer Ordnung oder Klasse. Es ist leicht verständlich, daß anscheinend Mißbildungen unserer Haussäugetiere sehr viel häufiger sind, als Deformitäten ihrer wilden Verwandten. Ob aber diese Erfahrung richtig ist, ob tatsächlich prozentual mehr Mißbildungen z. B. beim Hausschwein, als beim Wildschwein vorkommen, läßt sich nicht entscheiden. — Mißbildungen, in dem weiten Sinne wie es unserer Definition entspricht, sind beim Menschen — und ebenso bei den Haussäugetieren — außerordentlich häufig. Es ist kaum zu viel gesagt, daß nahezu jeder Mensch Träger irgend einer, wenn vielleicht auch nur geringen Mißbildung ist.

1e) Genese. Die Genese der Mißbildungen muß in eine formale und kausale Genese geteilt werden. Bei der Erforschung der formalen Genese fragen wir nach dem „Wie" der abnormen Entwickelung, nach der Entwickelungsgeschichte, der Ontogenese des Monstrums, die kausale Genese fragt nach dem „Warum" der abnormen Vorgänge. Im allgemeinen wird die Erforschung der formalen Genese den Feststellungen über kausale Genese vorangehen müssen.

α) Formale Genese. Eine Grundlage für die Erkenntnis der formalen Genese ist die Ermittelung der Entstehungszeit einer Mißbildung. Hierbei wird es selten möglich sein einen ganz bestimmten Zeitpunkt der Entstehung anzugeben. Wir werden uns eine Vorstellung über die Entstehungszeit auf Grund unserer Kenntnis der normalen Entwickelungsgeschichte und der genauen Untersuchung der fertigen Mißbildung machen dürfen. Wenn wir z. B. einen Defekt in der Ventrikelscheidewand des Herzens haben, so werden wir die normale Entwickelung des Herzens nach der Entstehungszeit des defekten Teils befragen und uns da-

nach ein Urteil bilden. Diese Methode wird uns aber nur Auskunft geben können, wann in der Entwickelungsgeschichte der Defekt zuerst morphologisch nachweisbar wurde, niemals wann die mißbildende Ursache eingewirkt hat. Diese kann sehr wohl auf die Herzanlage eingewirkt haben, als von einer Ventrikelscheidewand noch nicht im entferntesten gesprochen werden konnte, es kann ein Defekt möglicherweise schon im befruchteten Ei präformiert sein. Immerhin können wir schließen, daß spätestens zu der Zeit der normalen Entwickelung des betreffenden Teils der Ventrikelscheidewand die mißbildende Ursache eingesetzt haben muß. Wir bestimmen also durch die angeführte Methode nicht die Entstehungszeit der Mißbildung in kausalem Sinn, sondern nur die späteste mögliche Entstehungszeit. Die späteste mögliche Entstehungszeit nennen wir den teratogenetischen Terminationspunkt oder die teratogenetische Terminationsperiode.

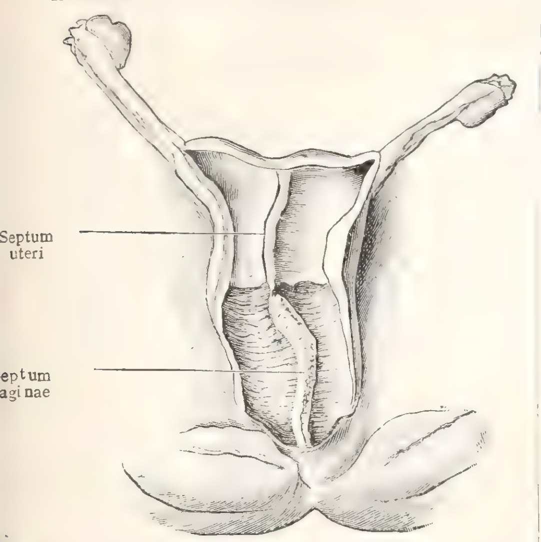


Fig. 1. Nicht völlige Verschmelzung der Müllerschen Fäden. Septumschwund ganz ausgeblieben. Beispiel einer Hemmungsbildung. Nach Winckel.

Als Begriffe der formalen Genese, als Bezeichnungen abnormer Entwickelungsvorgänge treten uns eine Reihe von Ausdrücken entgegen, wie Hemmungsbildung, Defektbildung, Ueberschußbildung, Spaltbildung, Verwachsung, weiterhin Keimverlagerung, Keimausschaltung. Hemmungsbildung und Defektbildung dürfen nicht miteinander verwechselt werden, es sind keineswegs gleichbedeutende Ausdrücke. Eine Hemmungsbildung kann, aber muß keineswegs eine Defektbildung sein, vielmehr kann auch eine



Fig. 2. Defekt der sternocostalen Partien des M. pector major sin. und Fehlen des M. pector minor sin. als Beispiel einer partiellen Defektbildung.

Anmerkung. Die Abbildungen sind dem Werk von E. Schwalbe, Morphologie der Mißbildungen, entnommen.

Ueberschußbildung oder eine abnorme Lagerung eine Hemmungsbildung bedeuten. Andererseits ist auch sicherlich nicht jede Defektbildung eine Hemmungsbildung. Hemmungsbildung bedeutet den Entwickelungs- und Wachstumsstillstand eines Organs oder eines Organteils. Eine Hemmungsbildung zeigt daher einen früheren Zustand der Ontogenese, als dem übrigen Entwickelungszustand des Organismus entspricht. Bekannt sind die Hemmungsbildungen der Ventrikel- und Vorhofsscheidewände des Herzens. Ein offenes Foramen ovale, ein Defekt im Septum membranaceum ist eine Hemmungsbildung. Ebenso ist aber Persistenz der Venae cardinales und des Ductus Arantii oder endlich ein unvollkommener Descensus der Hoden eine Hemmungsbildung. Ueber die kausale Genese soll mit der Bezeichnung einer Mißbildung als Hemmungsbildung nicht das geringste ausgesagt sein, als ein Begriff der formalen Genese ist der Ausdruck „Hemmungsbildung" nicht nur berechtigt, sondern geradezu unentbehrlich. Von den übrigen oben angeführten Begriffen der formalen Genese bedarf namentlich derjenige der „Spaltbildung" noch kurzer Erläuterung. Ich bin der Ansicht, daß wir diese Bezeichnung höchstens als rein morphologische, deskriptive beibehalten sollten, genetisch kann eine Spaltbildung das allerverschiedenste bedeuten. Es kann ein mangelhafter Schluß zweier Falten als Spaltbildung erscheinen oder es kann durch einen Defekt ein Spalt erzeugt werden oder es kann eine Ueberschußbildung einen scheinbaren Spalt erzeugen, kurz genetisch außerordentlich verschiedene Vorgänge sind als Spaltbildungen angesehen und beschrieben worden. Auch über die Berechtigung, abnorme Verwachsung anzunehmen, läßt sich häufig sehr streiten, doch muß die Möglichkeit nicht nur, sondern auch das Vorkommen abnormer Verwachsung bei der formalen Genese der Mißbildungen zugegeben werden.

Keimverlagerung und Keimausschaltung spielt namentlich in der Theorie der formalen Genese der Geschwülste eine große Rolle. Auch hier muß bei Annahme einer Verlagerung stets geprüft werden, ob die Tatsache, daß abnormes Gewebe an ungewohntem Ort angetroffen wird, nicht auch anders erklärt werden kann, als durch wirkliche Absprengung und Verschiebung. Oft handelt es sich um abnorme Differenzierung unverlagerten Ausgangsmaterials. Hier darf auf die Metaplasie hingewiesen werden.

β) Kausale Genese. Amniogene Mißbildungen. Die kausale Genese der Mißbildungen ist, ich möchte sagen, der Natur der Sache nach, ein Gebiet, in dem es wohl sehr viele mehr oder weniger berechtigte Vermutungen gibt, Sicherheit jedoch nur äußerst schwierig zu gewinnen ist. Man könnte versucht ein, zunächst einmal eine Einteilung in innere und äußere Ursachen zu treffen. Man könnte weitergehend versuchen, als „echte" Mißbildungen nur diejenigen zu bezeichnen, die primär wenigstens auf einer „Keimesvariation" beruhen, mit anderen Worten alle Verbildungen ausschließen, die nachweislich durch mechanische, thermische oder chemische Ursachen erst während der Entwickelung zustande kommen. Ein solcher Versuch ist nach dem jetzigen Stande unseres Wissens völlig aussichtslos. Im allgemeinen können wir uns eine Vorstellung über die Ursachen der Mißbildungen nur auf Grund unserer experimentellen Erfahrungen bilden. Wir müssen aber uns stets vor Augen halten, daß, selbst bei derselben Tierart, die Ursache der natürlich vorkommenden Mißbildung nicht mit der Ursache der künstlichen gleichartigen Monstrosität übereinzustimmen braucht. Gar ein Vergleich unserer Experimentalobjekte mit den menschlichen Mißbildungen hinsichtlich der Teratogenese ist äußerst selten zulässig. Wir müssen bei unserer morphologischen Definition der Mißbildungen bleiben und zugeben, daß innere Ursachen sowohl wie äußere d. h. physikalische und chemische Ursachen Mißbildungen hervorbringen können.



Fig. 3. Rechte Hand eines Fetus mit mehrfachen amniogenen Mißbildungen.

Die amniogenen Mißbildungen erfordern eine besondere Besprechung. Es sind Mißbildungen, die namentlich in der menschlichen Pathologie eine sehr große Rolle gespielt haben und noch spielen. Das Amnion kann in verschiedenster Weise Anomalien aufweisen, die ihrerseits wiederum zu Verbildungen des Embryo führen können. Vor allen Dingen sind es die Strangbildungen des Amnion, die sogenannten Simonartschen Stränge, die an den verschiedensten Stellen in den Körper des Embryo tief einschneiden können, Extremitäten amputieren, im Gesicht hochgradige Mißbildungen erzeugen. Vielfach sind diese Stränge mit festen Verwachsungen des Amnions mit dem Körper des Fetus und der Placenta verbunden. Aller-

schwerste Mißbildungen können auf diese Weise zustande kommen, und es versteht sich leicht, daß das Atypische dieser Mißbildungen geradezu typisch für die amniogene Entstehung ist. Zu welcher Embryonalzeit sich diese Mißbildungen entwickeln, ist im Einzelfalle nicht immer möglich festzustellen, auch hier werden wir festhalten müssen, daß die Veränderungen in früher Embryonalzeit schwerere Folgen haben, als in den späteren fetalen Perioden. Wie die Anomalien des Amnions aufzufassen sind, steht noch dahin. Vielfach hat man sich die Entstehung als fetale Entzündung vorgestellt, wahrscheinlicher ist, daß es sich um Entwickelungsstörungen des Amnion handelt. Hiernach wären die amniotischen Stränge und Verklebungen als die primäre Mißbildung anzusehen, die durch sie erzeugten Veränderungen des Fetus als sekundär. Man ist zum Teil außerordentlich kritiklos mit der Annahme bei der Hand gewesen, daß Mißbildungen amniogenen Ursprungs seien. Alle typischen Mißbildungen dürften sich nur sehr schwer auf Amnionveränderungen zurückführen lassen. So ist die typische Hasenscharte kaum amniogen, dagegen können die unregelmäßigen tiefen Gesichtsspalten amniogenen Ursprungs sein. Aehnlich steht es mit der Polydaktylie. Eine typische wohlausgebildete Polydaktylie, wie sie z. B. Barfurth bei seinen Hühnerversuchen sah, ist nicht amniogen, dagegen ist für manche Fälle von Polydaktylie, bei denen es sich mehr um einen fingerähnlichen Ansatz oder um eine oberflächliche Spaltung eines Fingers handelt, die amniogene Entstehung nicht ausgeschlossen.

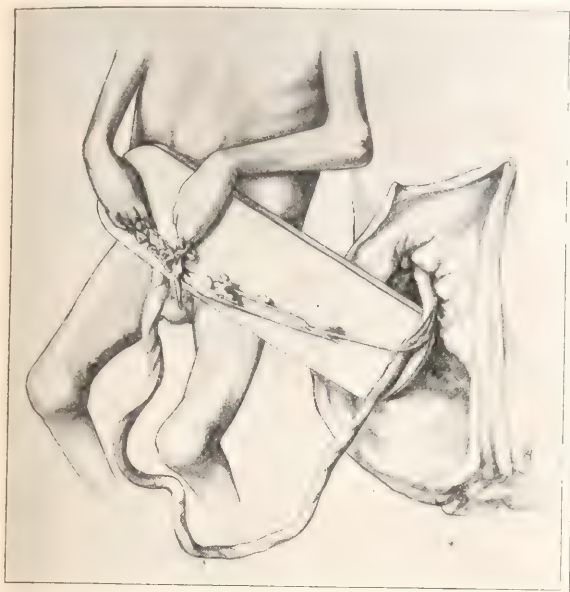


Fig. 4. Amniogene Mißbildung aus dem 5. Monat.

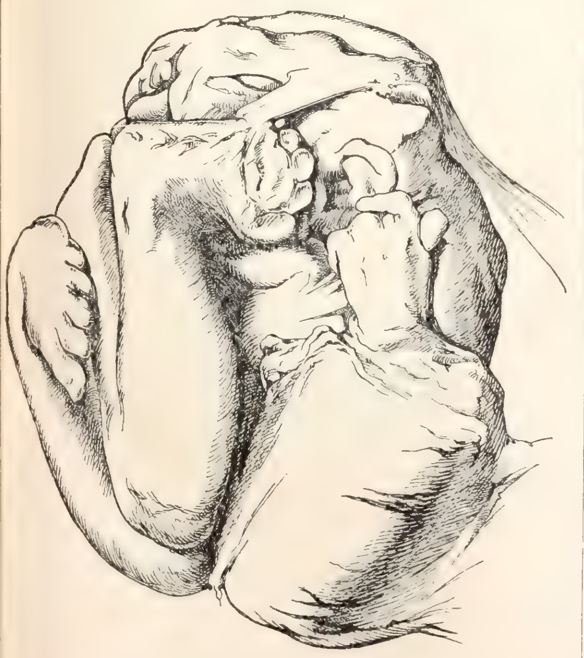


Fig. 5. Amniogene Mißbildung. Verkrümmungen des Körpers und der Extremitäten, Bauchbruch, von Amnion eng umhüllt.

1f) Regeneration und Mißbildung. Da die Regeneration eine der wichtigsten Wachstumserscheinungen darstellt, wir andererseits die Mißbildungen als Wachstumserscheinungen erkannt haben, so ist ein enger Zusammenhang von Regeneration und Mißbildung ohne weiteres verständlich. Eine große Reihe von Mißbildungen kommt durch eine irgendwie abnorme Regeneration zustande. Diese bezeichnen wir als regenerative Mißbildungen. Diesen könnte man die auf primärer Keimesvariation beruhenden Mißbildungen als generative Mißbildungen gegenüberstellen. Die Regeneration zerfällt bekanntlich in physiologische und pathologische Regeneration. Für die Entstehung der Mißbildung kommt natürlich allein die pathologische Regeneration in Betracht, die auch, einem Vorschlage Przibrams folgend, als akzidentelle Regeneration bezeichnet werden kann. Die akzidentelle Regeneration kommt entweder zustande nach Autotomie oder nach irgendeiner Verletzung. Die Autotomie ist Selbstverletzung, die an „präformierten Bruchstellen“ bei manchen Tierarten möglich ist. Wir teilen die pathologische Regeneration ein in Hyporegeneration, Hyperregeneration und Heteromorphose. Hierzu kommen noch einige besondere Rubriken, die

jedoch für unsere Mißbildungsbetrachtung von geringerer Wichtigkeit sind, die Regulation Drieschs und Morphallaxis Morgans. Bei der Hyporegeneration wird bei dem Wiederersatz der Teile weniger hergestellt als in Verlust geraten war. Wir nehmen eine solche Hyporegeneration bei den höheren Wirbeltieren, namentlich beim Menschen im erwachsenen Zustande wahr. Bei Verlust eines Fingers heilt wohl die Wunde, aber der Finger wird nicht neu geschaffen. Eine solche Hyporegeneration im embryonalen Zustande führt sicherlich mitunter zu Mißbildungen. Im großen ganzen werden wir sagen können, daß je älter der Embryo ist, desto mehr sein Verhalten bezüglich der Regeneration dem postembryonalen Leben gleicht, das Regenerationsvermögen nimmt mit zunehmendem Alter ab. Hyporegeneration liegt bei manchen Defektbildungen vor, bei sogenannten fetalen Amputationen durch Amnionstränge. Experimentell können wir an älteren Kaulquappen eine solche Hyporegeneration der Extremitäten verfolgen.

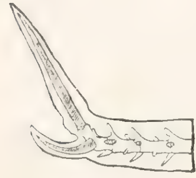


Fig. 6. Lacerta agilis mit doppelter Schwanzspitze. Röntgenbild. Beispiel von Hypergeneration. Nach Tornier.

Die Hyperregeneration schafft ein Mehr an Stelle des Zugrundegegangenen. Mehrarmige Seesterne, die normalerweise fünfarmig sein sollten, haben ihre überzähligen Arme durch Hyperregeneration erworben, wie sich auch experimentell erweisen läßt. Der Eidechsenschwanz kann hyperregenerieren, auf diese Weise kommt die bekannte doppelschwänzige Eidechse zustande. Künstlich läßt sich durch entsprechenden Schnitt eine Hyperregeneration am Schwanz von Molchen auslösen, auch Polydaktylie bei Tritonen kann durch Hyperregeneration zustande gebracht



Fig 7 bis 9. Larven von Rana fusca mit Cauda bifida. Nach Barfurth.

werden. Unter Heteromorphose, einem Ausdruck, den J. Loeb eingeführt hat, wollen

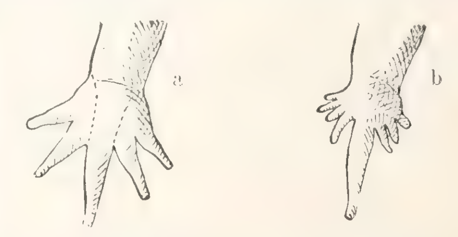


Fig. 10. Hintergliedmaße von Triton zur Demonstration der Hyperregeneration. In a ist der Operationsschnitt angedeutet. b zeigt den Erfolg. Nach Barfurth.

wir einen Regenerationsvorgang verstehen, dessen Resultat ein anders organisierter Teil

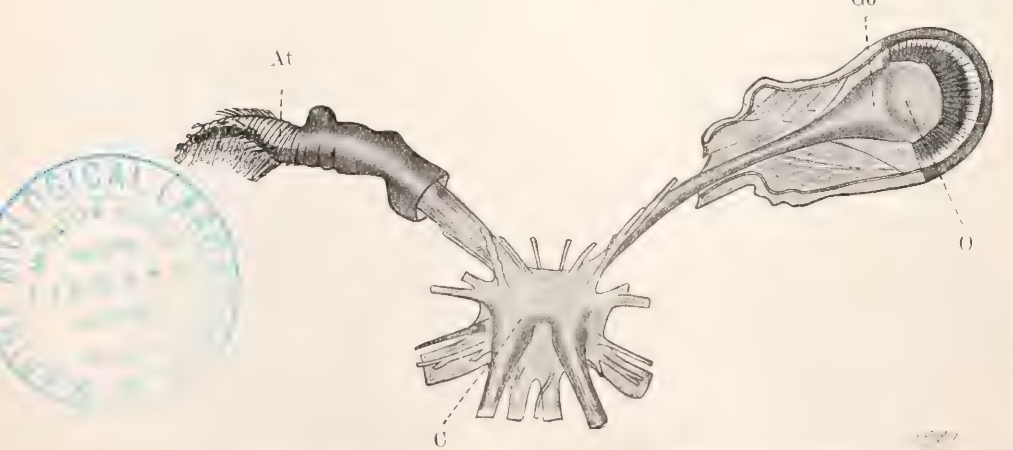


Fig. 11. Heteromorphose bei Palinurus vulgaris. Links ist eine Antennula regeneriert. At Antennula. C Gehirn. Go Ganglion opt. O Auge. Nach Herbst.

als der in Verlust geratene ist, dadurch müssen Mißbildungen zustande kommen. Solche Mißbildungen, die auf Heteromorphose beruhen, sind bei Krebsen beobachtet worden und auch experimentell erzeugt. So konnte Herbst bei Palinurus an Stelle eines Auges eine Antennula regenerieren lassen, wenn er das Ganglion opticum auf der operierten Seite mit fortnahm. Ein weiteres sehr schönes Beispiel ist von Loeb an Tubularia gegeben worden. Man kann diesen Hydroidpolypen dahin bringen, daß er an Stelle eines aus dem Stamm geschnittenen Stückes einen Kopf regeneriert.

1g) Mißbildung und Vererbung. Wenn wir den regenerativen Mißbildungen die generativen gegenüber gestellt haben, d. h. die Mißbildungen, die in der Weise einer Variation durch eine abnorme Keimesanlage zustande kommen, so müssen wir uns nach Beweisen umsehen, daß es derartige Mißbildungen gibt. Schon die früher erwähnte Tatsache, daß eine scharfe Grenze zwischen Variation und Mißbildung gar nicht gezogen werden kann, spricht sehr zugunsten der Annahme generativer Mißbildungen. Vor allem aber ist zu berücksichtigen, daß, was schon seit alten Zeiten bekannt ist, ein Teil der Mißbildungen und zwar gerade der typischen Mißbildungen vererbbar ist. Die enge Beziehung von Mißbildung und Variation wird auch dadurch gezeigt, daß bei der Rassenbildung unserer Haustiere mitunter Eigenschaften als Rasseneigentümlichkeit fortgezüchtet werden, die wir an dem Stammtier als Mißbildung bezeichnen müßten. Es sei hier an die Gehirnmißbildung der Houdanhühner und an die Polydaktylie mancher Hühnerrassen erinnert, die Barfurth zu seinen schönen Vererbungsversuchen benutzte. Die Polydaktylie kann überhaupt als ein Beispiel erblicher Mißbildung angeführt werden, das durch die vortrefflichen Analysen von Barfurth und Kaufmann-Braus besonderen wissenschaftlichen Wert gewonnen hat. Daneben erwähne ich namentlich die Colobomversuche Hippels, die auf eine Anregung Wessely's zurückgehen. Die Vererbung von Mißbildungen hat in der Pathologie eine große Bedeutung gewonnen. Sie ist außerdem ausgiebig von Darwin und von seinen Nachfolgern deszendenztheoretisch benutzt worden. Man darf sagen, daß nahezu alle Beispiele pathologischer Vererbung im weiteren Sinne als vererbte Mißbildungen angesehen werden könnten, so auch die vererbbaren Augenanomalien und selbst die Blutereigenschaft. Gerade an den Blutern ist die pathologische Vererbung sehr schön studiert worden, es haben sich eine Reihe von Vererbungsregeln gerade in den Nachkommentafeln von Blutern feststellen lassen (vgl. den Artikel „Vererbung“).

Das Auftreten einer vererbbaren Mißbildung geschieht nach Analogie einer Mutation, die Ausmerzung wohl vor allen Dingen durch Vermischung mit gesundem Blut. Die Vererbungsversuche Barfurths zeigten, daß der Einfluß des Vaters und der Einfluß der Mutter auf das Mißbildungsmerkmal der Nachkommenschaft als gleich groß anzusehen ist.

1h) Experimentelle Teratologie. Schon bei den regenerativen Mißbildungen ist erwähnt worden, daß ein großer Teil derselben durch das Experiment hergestellt worden ist, ja daß das Experiment geradezu uns das Urteil über die Frage, ob regenerative Mißbildung vorliegt oder nicht, an die Hand gibt. Ueber Regeneration ist schon außerordentlich lange an den verschiedensten Tieren experimentiert worden. Schon im 18. Jahrhundert hat Spallanzani seine berühmten Versuche über Regeneration angestellt. Wir dürfen sagen, daß die experimentelle Teratologie ebenso alt ist wie das Experiment über Regeneration, die Gesichtspunkte freilich, unter welchen Versuche zur Herstellung künstlicher Mißbildungen unternommen wurden, haben seit diesen ersten Zeiten außerordentlich gewechselt. Gerade in der Geschichte der experimentellen Teratologie sehen wir, daß nicht nur die Methodik, sondern vor allem die Fragestellung es ist, die Resultate zeitigt, sehen wir ferner, daß die Ergebnisse einer Disziplin dazu dienen müssen, um eine andere zu fördern. Die experimentelle Herstellung von Mißbildungen hat uns in der Erkenntnis der normalen Entwickelungsgeschichte, namentlich in der Erkenntnis der Kausalität des Entwickelungsgeschehens außerordentlich gefördert, andererseits ist erst durch die kausale Fragestellung der experimentellen Entwickelungsgeschichte, die sich nicht von der experimentellen Teratologie scharf trennen läßt, ist erst durch die Entwickelungsmechanik ein neuer und fruchtbarer Standpunkt für die Mißbildungslehre gewonnen worden. Die Gesichtspunkte nun, unter denen Versuche zur Herstellung von Mißbildungen unternommen werden können, lassen sich in drei Hauptrubriken sondern. Einmal können wir versuchen, die in der Natur vorkommenden Mißbildungen künstlich herzustellen. Hierher gehört die Hauptmenge der Versuche über regenerative Mißbildungen, soweit sie unter dem Gesichtspunkt der Fragestellung nach dem Entstehen der Mißbildungen unternommen werden. Das schon gebrauchte Beispiel der vielarmigen Seesterne könnte hier angeführt werden. Die Vielarmigkeit normal fünfarmiger Seesterne kann durch das Experiment als regenerative

Mißbildung erkannt werden. Freilich ist nicht ohne weiteres der Schluß erlaubt, daß jede in der Natur spontan vorkommende Mißbildung, die sich künstlich herstellen läßt, in der Natur dieselbe Entstehungsursache haben muß wie bei der künstlichen Herstellung. Zum mindesten muß bei einem derartigen Schluß gezeigt werden, daß ähnliche mechanische Einwirkungen, wie sie im Experiment zur Mißbildung führen, auch spontan sich ereignen können. So läßt sich etwa die Beobachtung, daß stark erschütterte Hechteier viele Doppelbildungen aufweisen, dafür verwerten, daß natürlich vorkommende Doppelbildungen ebenfalls durch Erschütterung entstanden sein dürfen, wie sie durch Strömungen im Wasser wohl hervorgebracht werden können. Der zweite Hauptgesichtspunkt, der bei Mißbildungsexperimenten zur Geltung kam, war nicht sowohl die Erforschung der Regeneration, als die Erforschung der mißbildenden Ursache, gewissermaßen unter dem Prinzip der Anwendung der verschiedenen Ursachen. Zum Teil wurde hierbei recht planlos experimentiert. So wurde etwa die Beschränkung des Sauerstoffes, Erschütterung der Eier, ungleichmäßige oder übermäßige Erwärmung geprüft. Dabei stellte sich heraus, daß keineswegs ein bestimmter Typus von Mißbildungen einer bestimmten in unseren Experimenten anwendbaren Ursache entspricht, daß z. B. durch Erschütterung verschiedenartige Mißbildungen erzeugt werden können, ein Resultat, das insofern auch ganz verständlich ist, als es naturgemäß sehr schwer ist, die Ursache in jedem einzelnen

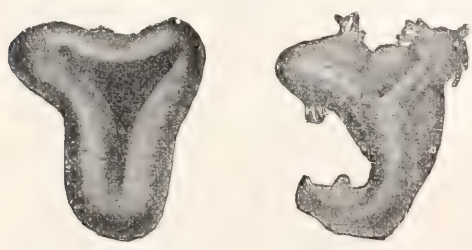


Fig. 12. Eine Duplicitas anterior in zwei verschiedenen Stadien experimentell erzeugt von O. Schultze.

Experiment gleichmäßig abzustufen. In neuerer Zeit hat man gelernt hier die Fragestellung zu verbessern. Es sind beispielsweise Experimente unter dem allgemeinen Gesichtspunkte angestellt worden, ob durch bestimmte Vergiftungen bestimmte Mißbildungen hervorgebracht werden können, ich nenne hier die neuen Experimente von Pagenstecher, dem Erzeugung von Schichtstaar bei Kaninchenembryonen mit Hilfe des Nikotins gelang. Die dritte Rubrik ist die entwickelungsmechanische Fragestellung. Hierbei fällt gewissermaßen die Aufklärung dieser Experimente für die Mißbildungslehre als Zugabe dem Untersucher in den Schoß, wenn dieser das Problem normalen Entwickelungsgeschehens durch Veränderungen der Entwickelungsbedingungen prüft. Es versteht sich, daß nicht immer ein jedes Experiment unter eine dieser drei Rubriken eingereiht werden kann, daß ein Experiment wohl für

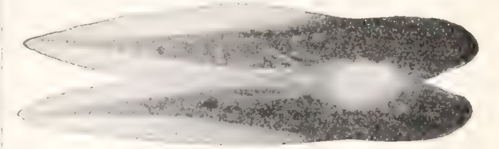


Fig. 13. Gleichsinnige Bauchvereinigung zweier Larven von Rana esculenta. Nach Born.

alle drei zugleich gelten kann. Es bilden diese drei Rubriken nur eine übersichtliche Sonderung. Bei der außerordentlichen Menge der Eingriffe an Embryonen, die zu Mißbildungen führen, ist es selbstverständlich nicht möglich, hier auch nur eine annähernde Uebersicht zu geben, zumal wir gesehen

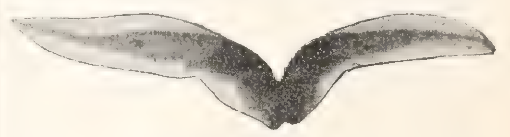


Fig. 14. Vereinigung zweier Larven am Kopf. Nach Born.

haben, daß eine sehr große Reihe entwickelungsmechanischer Experimente von uns berücksichtigt werden muß, es seien daher nur einzelne bemerkenswerte Versuche als Beispiele herausgegriffen, wobei es selbstverständlich nicht möglich ist, auch nur die wichtigsten Versuche zu bringen.

Zuerst erinnere ich an die berühmten Versuche Roux' über Hemiembryonen. Ein solcher Hemiembryo ist sicherlich eine Mißbildung. Roux zerstörte nach der ersten Furchung der Eier von Rana fusca eine der beiden Blastomeren mit einer heißen Nadel, es entwickelte sich aus der anderen Blastomere, die unversehrt geblieben war, eine Halbbildung. An diese Halbbildung schloß sich eine Postgeneration (vgl. den Artikel „Regeneration"). Wir können hier auch die Versuche Boveris über die Befruchtung kernloser Stücke von Seeigeleiern anführen, da solche kernlosen Cytoplasmateile sicherlich als Verbildungen anzusehen sind. Auch die Resultate einer derartigen Befruchtung sind nicht normal, vielmehr zeigen die Gastrulae und Plutei, die aus solchen kernlosen Stücken von Seeigeleiern hervorgehen, Zellen, die gegenüber der Norm beträchtlich kleinere Kerne aufweisen. Loeb erhielt bei seinen ausgezeichneten Experi-

menten über Parthenogenese zahlreiche Mißbildungen. Experimente T o r n i e r s, die unter dem Gesichtspunkt der Erforschung der Regeneration an Knoblauchskröten angestellt wurden, ergaben Tiere mit überzähligen Extremitäten, also Mißbildungen. Die künstlichen Gabelschwänze, die regenerative Vermehrung von Zehen bei Tritonen



Fig. 15. Künstliche „Craniopagen". Nach B o r n.



Fig. 16. Bauchvereinigung einer Larve von Rana esculenta mit einer solchen von Rana arvalis. 12 Tage, 5fache Vergrößerung. Nach Born.



Fig. 17. Das etwas hinter der Mitte abgesetzte Hinterstück einer Larve von Rana esculenta einer zweiten an den Bauch angesetzt (parasitische Doppelbildung). Nach B o r n.



Fig. 18. Triton taeniatus mit weitgehender Verdoppelung des Vorderendes, Duplicitas anterior. Nach Spemann.



Fig. 19. Dasselbe wie Fig. 18 von der Bauchseite.

wurde bereits erwähnt. — Besondere Berücksichtigung verdienen die B o r n schen Verwachsungsexperimente, die auch für die Lehre

der Doppelbildungen von größter Bedeutung sind, ebenso wie die Schnürungsexperimente Spemanns. Die Bornsche Methode benutzten Harrison und Braus zu glänzenden Versuchen über embryonale Transplantation. Die Frage der Abhängigkeit der Regeneration vom Nervensystem oder von Drüsen mit innerer Sekretion, die neuerdings Walther prüfte, verlangt Experimente, bei denen er zur künstlichen Verbildung des Versuchstieres kommt. Die entwickelungsmechanisch so wichtige Frage nach der funktionellen Struktur des Knochens wurde von Fuld durch Experimente an jungen Hunden, die er der Vorderbeine beraubt hatte, in Angriff genommen.

2. Doppelbildungen. a) Allgemeines. Wir wollen im folgenden die von mir gegebene Definition der Doppelbildungen annehmen, die sich dem Sinne nach mit vielen früheren deckt. Körper, die mindestens eine teilweise Verdopplung der Körperachsen aufweisen, bezeichnen wir als Doppelbildungen. Eine andere Auffassung versteht unter Doppelbildung auch eine jede vollständige oder teilweise Verdopplung eines normal einfachen Organs. So würde ein überzähliger Finger oder Zehe als Doppelbildung angesehen werden müssen, ein überzähliger Hoden oder eine Nebenmilz hierher gehören. Damit ist der Begriff der Doppelbildung so weit gezogen, daß auch genetisch in keiner Weise zusammengehörige Mißbildungen unter der Rubrik „Doppelbildungen" abgehandelt werden müßten. Aus diesem und anderen Gründen wollen wir die oben gegebene Definition annehmen.

Die Doppelbildungen sind eineiige Zwillinge, oder eineiige Zwillinge sind Doppelbildungen, das heißt, wir haben Grund anzunehmen, daß die Doppelbildungen, wie wir sie soeben abgrenzten, aus einem befruchteten Ei hervorgegangen sind. — Die Doppelbildungen sind gleichgeschlechtlich, sollten die spärlichen mitgeteilten Fälle ungleichen Geschlechts weiterer Kritik standhalten, so wäre dieser Umstand in Analogie des Hermaphroditismus aufzufassen.

Hinsichtlich der Häufigkeit der Doppelbildungen ist vor allem das wiederholt festgestellte Ueberwiegen des weiblichen Geschlechts, wenigstens beim Menschen hervorzuheben. Nach Förster beträgt das Verhältnis von weiblichen zu männlichen Doppelbildungen 2 : 1. Ueber die absolute Häufigkeit der Doppelbildungen ist es schwer ein zutreffendes Bild zu geben. Nur beim Menschen sind wir einigermaßen orientiert. Wir müssen für diese Angabe Doppelbildung und Doppelmißbildung trennen. Doppelbildung ist der umfassendere Begriff, der auch die eineiigen Zwillinge unter sich einreiht, die natürlich keine Mißbildungen sind. In Deutschland wurden 1902 im ganzen 25 980 Zwillingsgeburten verzeichnet, darunter 9786 Pärchen verschiedenen Geschlechts, 8355 waren gleichgeschlechtlich männlich, 7839 gleichgeschlechtlich weiblich. Nehmen wir nach Weinberg an, daß unter den zweieiigen Zwillingen 50% Pärchen sind, so würden $9786 \times 2 = 19\,572$ zweieiige Zwillinge anzunehmen sein, der Rest von 6408 würde auf die eineiigen entfallen. Irgendeine sichere Angabe über die Häufigkeit der Doppel*miß*bildungen ist jedoch nicht aufzustellen. Der Vergleich der verschiedenen Tierklassen ergibt, daß bei den Wirbeltieren prinzipiell gleichartige Doppelmißbildungen vorkommen, freilich ist die einzelne Form nicht bei allen Klassen von gleicher relativer Häufigkeit. Die Mehrfachbildungen der Wirbellosen lassen keinen oder nur einen entfernten Vergleich mit den Doppelbildungen der Wirbeltiere zu, was sich schon aus unserer Definition ohne weiteres ergibt, die eine „Körperachse" voraussetzt.

2 b) Einteilung. Wir teilen die Doppelbildungen ein in freie und zusammenhängende, symmetrische und asymmetrische Doppelbildungen.

Folgende Einteilung gibt eine Uebersicht:

1. Freie Doppelbildungen (Gemini).

a) Symmetrische: Eineiige Zwillinge.
b) Asymmetrische: Acardii.

2. Zusammenhängende Doppel(miß)bildungen.

a) Symmetrische: Eigentliche Doppelmißbildungen.
b) Asymmetrische: Parasitäre Acardii.

2 c) Genese. Wenn wir die Genese der Doppelbildungen betrachten, so gehen wir von symmetrischen Formen aus, die Genese der asymmetrischen Formen wird gesondert zu besprechen sein, sie ist prinzipiell mit der Genese der symmetrischen Formen in Zusammenhang zu bringen.

Werfen wir, ehe wir einige Resultate der Forschungen über die Genese der Doppelbildungen mitteilen, kurz einen Blick auf die Methodik dieser Forschungen. Es stehen uns drei Erkenntnisquellen zur Beurteilung der Genese zur Verfügung. Einmal die genaue anatomische Untersuchung der fertigen Doppelbildung und die Retrokonstruktion der gefundenen Anomalien. Das heißt, wir müssen mit Hilfe unserer Kenntnis der normalen Entwickelungs-

geschichte den Bau der fertigen Doppelbildung sozusagen nach rückwärts, eiwärts projizieren. Dies ist vielleicht die wichtigste Quelle unseres Wissens. Unterstützt wird diese Methode durch das Auffinden und die genaue Untersuchung früher Stadien von Doppelbildungen. Es können solche frühen Stadien zum Teil eine Bestätigung unserer Retrokonstruktion bringen oder können dieselbe in wesentlichen Punkten verbessern, doch müssen wir andererseits stets im Auge behalten, daß, namentlich wenn wir sehr frühe Stadien von Doppelbildungen beurteilen, wiederum die Schwierigkeit der, wenn ich so sagen darf, Vorwärtskonstruktion hinzutritt; das heißt, es wird nicht immer leicht sein zu sagen, welche weitere Entwickelung eine früh beobachtete Doppelbildung genommen hätte, wenn sie sich ungestört hätte weiter entwickeln können. Nur ein kritisches Nebeneinanderanwenden der eben genannten Forschungsmethoden darf auf richtige Resultate hoffen. Als dritter Weg der Erkenntnis kommt die experimentelle Methode hinzu, die uns gerade auf dem Gebiet der Doppelbildungen recht gefördert hat.

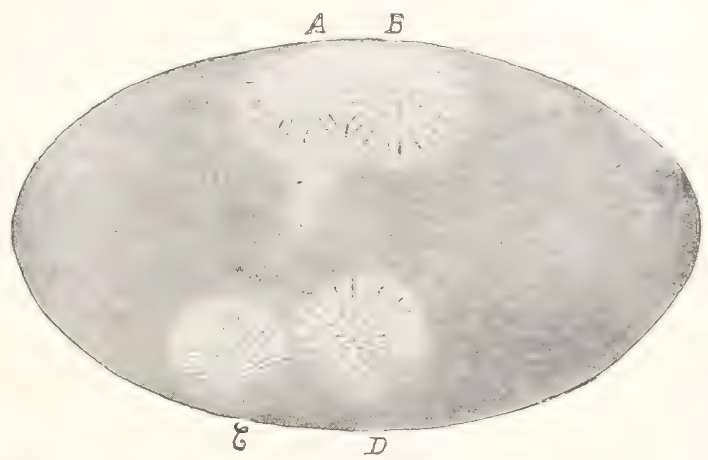


Fig. 20. Ei einer Ringelnatter mit vier Keimscheiben auf dem groben Furchungsstadium. Vergrößerung 1 : 5. Nach Wetzel.

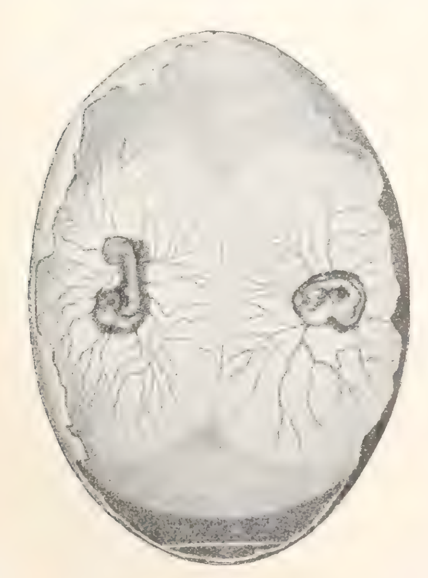


Fig. 21. 7 Tage bebrütetes Entenei mit einfachem Dotter, der aber 2 völlig voneinander getrennte normale lebendige Embryonen trug. Nach Panum.

α) Formale Genese. Fragen wir zuerst nach der formalen Genese der Doppelbildungen, so wird nach dem vorher Gesagten vor allem die Entstehungszeit zu bestimmen sein. Für die symmetrischen



Fig. 22. Doppelbildung („Mesokatadidymus“) der Ente. Nach Fischel.

zusammenhängenden Doppelbildungen, die eigentlichen Doppelmißbildungen, können wir als teratogenetische Terminationsperiode die Gastrulation hinstellen. Es ist nicht möglich hier



Fig. 23. Kephalothoracopagus monosymmetros vom Hühnchen. 48 Stunden beobachtet. 5 fach vergrößert. Nach Kästner.

die Erwägungen, die zu diesem Resultat führen, ausführlich zu geben, ich muß in dieser Hinsicht auf mein Lehrbuch der Mißbildungen Teil II verweisen. Mit der Annahme dieser Terminationsperiode, die höch-



Fig. 24. Kopf des Embryos Fig. 23. 25 fach vergrößert. Nach Kästner.

stens für ganz geringe vordere Verdopplung noch etwas geburtswärts verschoben werden könnte, werden, wie nebenbei bemerkt sei, eine Anzahl von Theorien hinfällig, so vor allem die Torniersche, jetzt freilich von ihm abgeänderte Anschauung der „Bruchdoppelbildung", eine Lehre, die auch von Przibram im wesentlichen angenommen wurde, die aber für die symmetrischen Doppelmißbildungen der Wirbeltiere sicherlich nicht als zutreffend angesehen werden darf.

Durch diese Festlegung der teratogenetischen Terminationsperiode sind immerhin noch eine ganze Reihe von Möglichkeiten der formalen Genese offen gelassen. Es könnten die Doppelbildungen einmal, wenn wir eine zeitliche Einteilung versuchen, zustande kommen durch Abnormitäten innerhalb der unbefruchteten Geschlechtszellen oder aber durch Anomalien des befruchteten Eies vom Augenblick der Befruchtung an bis eben zu dem Momente der Gastrulation.

Es steht also für die Genese der Doppelbildungen ein erheblicher Entwicklungsspielraum zur Verfügung. Die eben angedeuteten zeitlichen Möglichkeiten sind nun auch in verschiedenen Theorien der formalen Genese in Betracht gezogen worden. Sowohl zweiköpfige und zweischwänzige Spermien, sowie zweikernige Eier hat man als Veranlassung der Doppelbildung angesehen, ferner ist Doppelbefruchtung eines Eies, sei es eines zweikernigen oder einkernigen, durch zwei Spermien in Betracht gezogen worden, endlich eine Teilung des Eimaterials nach der Befruchtung. Das Experiment beweist, daß aus einem normal befruchteten Ei eine Doppelbildung entstehen kann, die übrigen angeführten Theorien sind durch diese Erfahrung selbstverständlich nicht widerlegt, können sich jedoch kaum auf irgendwelche Beobachtungstatsachen stützen. Wir können als das Resultat der Forschung über formale Genese der Doppelbildung und Doppelmißbildung zusammenfassend ausgeben, daß es sich um eine Sonderung des ursprünglichen einheitlichen Eimaterials in zwei Teile handelt. Diese Vorstellung erlaubt uns die formale Genese aller Doppelbildungen einheitlich aufzufassen. Bei den freien symmetrischen Doppelbildungen ist die Sonderung eine nahezu vollkommene. Eine vollkommene Sonderung würde Zwillinge ergeben, die dichorial sind, das heißt, die bei der Geburt als zweieiig angesehen werden. Eine mehr oder weniger unvollkommene Sonderung ergibt sodann die verschiedenen Formen der symmetrischen Doppelbildungen von eineiigen Zwillingen bis eben zum Dicephalus. Für die asymmetrische Form ist im Prinzip dieselbe formale Genese anzunehmen, nur mit dem Zusatz, daß die beiden sich sondernden Teile von sehr ungleicher Größe sind, und daß ferner für die asymmetrischen Doppelbildungen die teratogenetische Terminationsperiode wohl auch noch eine spätere sein kann als die Gastrulation.

β) Kausale Genese. Ueber die kausale Genese der spontan vorkommenden Doppelbildungen läßt sich naturgemäß nichts Sicheres aussagen. Die beiden Hauptmöglichkeiten sind 1. Keimesvariation, 2. äußere Ursachen. Die Möglichkeit beider Kategorien darf nicht in Abrede gestellt werden. Daß primäre Keimesvariation eine Rolle spielen könnte, wird durch die Tatsache wahrscheinlich gemacht, daß eineiige Zwillinge wiederholt ein familiäres Vorkommen aufzeigen. Analoges soll auch von Tierzüchtern beobachtet sein, doch sind diese Angaben recht unsicher. Daß äußere Ursachen, Erschütterung, Schnürung, überhaupt mechanische Einwirkungen, Doppelbildungen experimentell hervorbringen, wurde schon erwähnt. Es kann somit auch die Möglichkeit nicht geleugnet werden, daß durch mechanische Ursachen spontan Doppelbildungen hervorgebracht werden.

2d) Hauptformen der Doppelbildung. Wir wollen nun in aller Kürze einige der hauptsächlichsten Formen der Doppelbildung durchgehen.

Eineiige Zwillinge — die symmetrischen freien Doppelbildungen — werden auch als Chorioangiopagen bezeichnet. Es



Fig. 25. Holoacardius amorphus von der linken Seite.

wird durch diesen Namen zum Ausdruck gebracht, daß eine vollkommene Sonderung nicht stattgefunden hat, sondern eine Verbindung durch die Placenta besteht. Es kann also diese Form nur bei Placentariern beobachtet werden. Bei den eierlegenden Sauropsiden sowie den Fischen finden wir stets eine durch den Dottersack hergestellte Verbindung solcher eineiigen Zwillinge. Von diesen leiten die Acardier sich in der Weise ab, daß man einen Zwilling sich reduziert vorstellen muß. Der Name Acardius deutet an, daß dieser reduzierte Zwilling oder Individualteil kein funktionierendes Herz besitzt. Das motorische Zentrum seines Blutkreislaufes ist das Herz des wohlentwickelten Individualteils. Daraus folgt, daß in dem Acardius eine Umkehr des Blutkreislaufes stattfindet, wie schon Claudius 1859 betont hat. Die Reduktion des Acardius kann mehr oder weniger weit gehen und kann hauptsächlich die obere oder untere Körperhälfte betreffen. Unter Hemiacardius verstehen wir einen verhältnismäßig



Fig. 26. Medianschnitt des Amorphus Fig. 25.

wenig defekten Acardius, während der Amorphus oder Anideus die höchsten Grade des Defektes erkennen läßt, und mitunter nur einen Klumpen an einer Nabelschnur vorstellt, der auf dem Durchschnitt ein System von Cysten aufweist. Der häufige Acardius acephalus läßt den Hauptdefekt in der oberen Körperhälfte erkennen, während der sehr seltene Acardius acormus die obere Körperhälfte, namentlich den Kopf, sehr gut

entwickelt zeigt, dagegen einen völligen Mangel der unteren Körperhälfte aufweist.

Was die Genese der Acardii betrifft, so sind als die beiden Haupttheorien die des primären Bildungsmangels und die der sekundären Defektbildung anzusehen. Eine Entscheidung ist insofern vielleicht nicht ohne weiteres zu treffen, als auch bei der Annahme einer frühen Entstehung der Acardii ein Zugrundegehen einzelner schon angelegter Teile keineswegs ausgeschlossen ist oder auch nur unwahrscheinlich erscheint. Doch muß Stellung genommen werden gegen die Annahme einer späten Entstehung der Acardii. Zum Teil hat man noch im 4. bis 5. Schwangerschaftsmonate beim Menschen die Acardii sich bilden lassen, das dürfte nach dem heutigen Stand unserer Kenntnisse als nicht zutreffend bezeichnet werden. Auch für die bei Sauropsiden beobachteten Acardier, die stets durch den Dottersack mit dem ausgebildeten Individualteil zusammenhängen, muß eine frühe Entstehungszeit angenommen werden.



Fig. 27. Hemiacardius.



Fig. 28. Holoacardius acephalus.

Wir kommen nunmehr zu den symmetrischen zusammenhängenden Doppelbildungen, den eigentlichen Doppelmißbildungen. Es ist nicht leicht eine befriedigende Einteilung dieser Formen zu geben, insbesondere ist zurzeit nicht möglich die Genese als Einteilungsprinzip zugrunde zu legen. Ich habe daher als ein rein morphologisches Einteilungsprinzip die Stellung der Symmetrieebene der menschlichen Doppelbildungen gewählt, bin mir aber sehr wohl bewußt, daß damit das Ideal einer Einteilung noch nicht erreicht ist. Wir können hier wohl von jeder einzelnen Einteilung absehen und uns vielmehr sofort zu den Hauptformen wenden.

Eine der auffallendsten und wenigstens beim Menschen und bei Säugetieren wichtigsten Formen ist der Cephalothoracopagus. Der doppelt symmetrische Cephalothoracopagus verdient den Namen des Janus und man hat danach wohl auch alle Cephalothoracopagen als Janusbildungen bezeichnet. — Für die symmetrischen Doppelbildungen

lassen sich in der Regel unschwer doppeltsymmetrische und einfachsymmetrische Formen unterscheiden. In jedem Fall ist eine Ebene vorhanden, die sogenannte Symmetrieebene, zu welcher die Teile der Doppelbildung zu beiden Seiten symmetrisch sich anordnen. Eine Symmetrieebene teilt zugleich die Doppelbildung so, daß auf der einen Seite der Anteil des einen, auf der anderen Seite der Anteil des anderen Individualteils liegt. Bei den doppeltsymmetrischen Formen sind zwei derartige Ebenen vorhanden, die zweite Symmetrieebene kann als Mediansymmetrieebene bezeichnet werden, insofern sie mit der Medianebene der beiden Individualteile zusammenfällt. Es steht die Mediansymmetrieebene senkrecht auf der Hauptsymmetrieebene. Diese Unterscheidung von Hauptsymmetrieebene und Mediansymmetrieebene wird besonders beim doppeltsymmetrischen Cephalothoracopagus außerordentlich klar. Denken wir uns nun die Medianebenen gegeneinander gedreht, so daß sie im Winkel zueinander stehen, also eine Mediansymmetrieebene nicht mehr existiert, so kommen wir von den doppeltsymmetrischen zu den einfachsymmetrischen Formen.

Der doppeltsymmetrische Cephalothoracopagus zeigt zwei Rükkenflächen und rechtwinklig zu diesen Rückenflächen zwei gleichmäßig ausgebildete sekundäre Vorderseiten. Auf diesen finden wir Gesicht, Brust und oberen Bauchteil bis zum Nabel. Der Nabel



Fig. 29.



Fig. 29 u. 30. Cephalothoracopagus disymmetros. Die beiden sekundären Vorderseiten sind fast absolut ähnlich. Ich mache auf die Beschaffenheit der inneren Augenwinkel aufmerksam. Die Augenspalte macht überall den Eindruck, als sähe man sie von lateral, nicht von vorn.

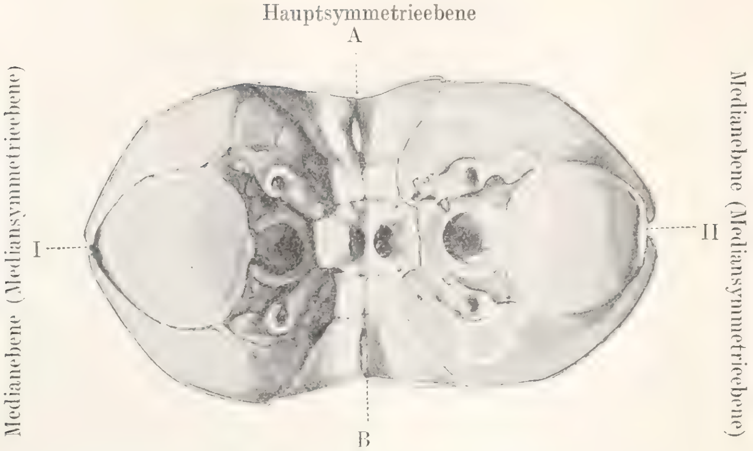


Fig. 31. Schädelbasis des Cephalothoracopagus disymmetros.



Fig. 32. Thoracopagus disymmetros von einer der beiden sekundären Brustvorderseiten.

ist einfach und liegt auf der Unterfläche des Zusammenhanges zwischen beiden Individualteilen. Vom Nabel ab sind beide Individualteile gesondert, die unteren Extremitäten sind also für jeden Individualteil wie in der Norm angeordnet. Nach den unteren Körperhälften kann man sich auch leicht über die Zugehörigkeit der oberen Körperhälfte orientieren. Jede sekundäre Vorderseite wird zur Hälfte von dem einen, zur Hälfte von dem anderen Individualteil gebildet. Danach versteht sich auch der innere Bau. Man denke sich zwei mit dem Gesicht gegenüberliegende Individuen bis zur Wirbelsäule oder, genauer gesagt, bis zur Hinterwand des Oesophagus aufgeschnitten, auseinandergeklappt, aneinandergeschoben, so erhält man das Schema des Cephalothoracopagus. Genaueres ist in meinem Lehrbuch der Mißbildungen nachzulesen.

Vom doppeltsymmetrischen Cephalothoracopagen können wir die monosymmetrische Form uns so abgeleitet

denken, daß wir uns auf der einen Seite einen mehr oder weniger großen, keilförmigen Defekt herausgeschnitten vorstellen und durch Drehung der Medianebene diesen Defekt wiederum zum Schluß bringen. So versteht sich die monosymmetrische Form mit Cyklopie auf der defekten Vorderseite und bei weiterer Reduktion eine Rückführung der Gesichter auf eine einfache Synotie, ja es kann zur völligen Aprosopie kommen. Im Gebiet des Thorax kann auf der defekten sekundären Vorderseite das Herz mehr oder weniger reduziert erscheinen, schließlich können die beiden Extremitäten der defekten Vorderseite miteinander verschmelzen und als einheitliche Extremität imponieren. Es ist gelungen, experimentell janusähnliche Doppelbildungen herzustellen.

Der Thoracopagus unterscheidet sich vom Cephalothoracopagus schon äußerlich entscheidend dadurch, daß ein Zusammenhang nur im Gebiete der Brust vorhanden ist. Dieser Zusammenhang kann wiederum ein mehr oder weniger ausgedehnter sein und kann schließlich sich auf eine dünne Substanzbrücke in der Gegend des Processus xiphoides beschränken (Sternopagen, Xiphopagen), das letztere war bei den siamesischen Zwillingen der Fall. In der inneren Organisation weichen auch die ausgesprochenen Thoracopagen von den Cephalothoracopagen insofern ab, als wir uns, um in dem eben gebrauchten Bilde zu bleiben, die beiden Individualteile nur ganz oberflächlich aufgeschnitten vorstellen dürfen. Nur das Sternum verhält sich wie das der Cephalothoracopagen, die Herzen stehen miteinander nicht in Zusammenhang, jeder Individualteil hat sein eigenes Herz. Die meisten Thoracopagen sind monosymmetrisch. Bei stärkerem Defekt der einen sekundären Vorderseite kommt es leicht zu Verschmelzung der Extremitäten dieser Vorderseiten (Thoracopagus dibrachius). Eine Zwischenform von Cephalothoracopagus und Thoracopagus ist der Prosopothoracopagus. Erstreckt sich der Zusammenhang der beiden Individualteile nach unten oder hinten über den Nabel hinaus, d. h. ist auch im Beckenabschnitt ein Zusammenhang vorhanden, so haben wir den Ileothoracopagus vor uns, der ebenfalls meist monosymmetrisch vorkommt. Dieser leitet über zu dem Ischiopagus, einer höchst auffallenden Form. Der Ischiopagus zeigt einen infraumbilikalen Zusammenhang. Seine Organisation ist analog wie die des Cephalothoracopagus zu verstehen, nur müssen wir die Verhältnisse des Cephalothoracopagus vom supraumbilicalen auf den infraumbilicalen Teil sozusagen übertragen. Beim Menschen weisen die beiden Köpfe eines Ischiopagus voneinander weg und senkrecht zu diesen stehen die Beinpaare, so daß eine eigenartige Kreuzform zustande kommt, die man am leichtesten bei Orientierung der Mißbildungen nach Himmelsgegenden versteht. Zeigen die Köpfe nach Süden und Norden, so sind die Beinpaare nach Osten und Westen gerichtet. Die Symmetrieebene wäre bei einer derartigen Orientierung von Ost nach West zu ziehen.



Fig. 33. Ischiopagus disymmetros.

Außer zum Ischiopagus leitet der Ileopagus zu den Dicephalis über, der Duplicitas anterior, der häufigsten Doppelbildung bei niederen Wirbeltieren, namentlich bei Fischen. Es ist eine Streitfrage, ob bei dieser Duplicitas anterior die Achse stets völlig verdoppelt ist, wenigstens in der Chorda, wie Kästner will. Ich halte die Kästnersche Ansicht nicht für richtig. Der Gegensatz der Duplicitas anterior ist die Duplicitas posterior, die hintere Verdopplung, sehr selten, namentlich beim Menschen nur in wenigen Fällen beobachtet. Bei manchen Fischen ist eine sogenannte Duplicitas media beschrieben worden, der mittlere Teil der Körperachse erwies sich als doppelt. Vom Ischiopagus aus ist es leicht, zum Pygopagus zu gelangen, einer diom-

phalen, oft doppeltsymmetrischen Doppelbildung. Der Zusammenhang ist in der Sacrumgegend gegeben. Es sind lebensfähige Doppelmißbildungen, von denen manche



Fig. 34. Dicephalus der Katze. Nach Gurlt.

ein vorgerückteres Alter erreicht haben. Sehr selten ist der Zusammenhang zweier gleichmäßig ausgebildeter Individualteile am Kopf, der Craniopagus.

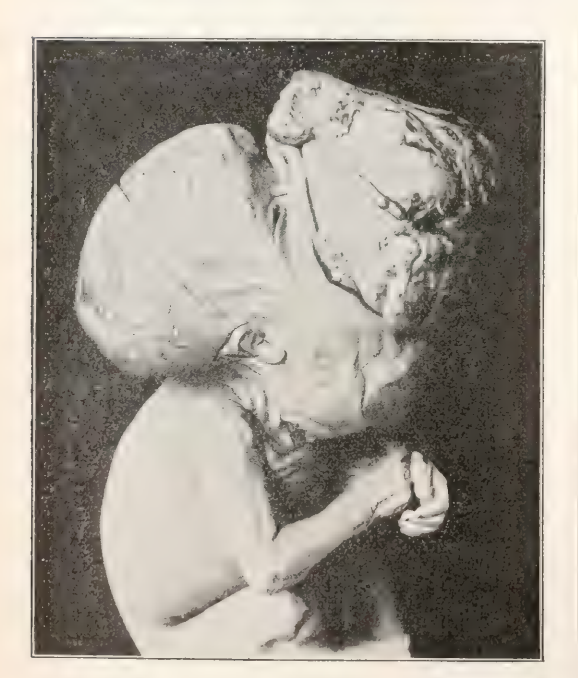


Fig. 35. Epignathus.

Die asymmetrischen parasitären Doppelbildungen werden am besten nach dem Ort ihres Vorkommens eingeteilt. Wir können sie als Acardier betrachten, die mit dem zweiten wohl ausgebildeten Individualteil in direktem körperlichen Zusammenhange stehen. In der Regel sind es Acephalen oder Amorphi, die als parasitäre Doppelbildungen auftreten. Sie können entweder äußerlich — und das sind die eigentlichen derartigen Mißbildungen dem ausgebildeten Individualteil aufsitzen oder aber sie können in demselben eingeschlossen sein, dann spricht man wohl von Inclusio fetalis. Es sind diese asymmetrischen Doppelbildungen von großer Wichtigkeit für den Pathologen, weil sie zu den sogenannten Wundergeschwülsten oder Teratomen überführen, und diese wieder eine Verbindung mit den echten Geschwülsten darstellen. Die Ausbildung der



Fig. 36. Parasitäre Doppelbildung. Supraumbilikaler Sitz des Parasiten, an der Ventralseite des Autositen.

asymmetrischen parasitären Doppelbildung kann ebenso wie die der Acardier außerordentlich verschieden sein. Ich habe bei dem Epignathus vier Gruppen unterschieden. In der ersten Gruppe finden wir eine Nabelschnur am Gaumen des ausgebildeten Individualteils, des Autositen, befestigt. In

der zweiten Gruppe ragt ein Acardius acephalus aus dem Munde hervor, in der dritten eine Geschwulst, die meist cystisch, vom Bau des Teratoms, mikroskopisch Derivate aller drei Keimblätter in sich birgt. Die vierte Gruppe zeigt noch einfacheren Bau, hierher gehören die behaarten Rachenpolypen.

Eine ganz ähnliche Reihe läßt sich beim Epigastrius, d. h. bei den am Epigastrium aufsitzenden parasitären Bildungen nachweisen, ebenso an den Orbitalparasiten, weiterhin besonders schön an den Sacralparasiten. Es kann also diese Gruppierung als allgemeiner gültig wohl angesehen werden. Was die Genese betrifft, so ist namentlich von Askanazy betont worden, daß auch die Teratome — und ein Teil dieser Parasiten kann ja als Teratome bezeichnet werden — aus einem einwertigen Keim hervorgehen. Das gilt ebenso für die Teratome der Geschlechtsdrüsen. Es kann sein, daß Askanazy im Recht ist. Ziemlich allgemein ist

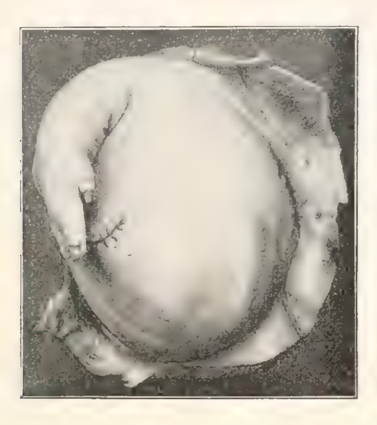


Fig. 37. Subkutaner Sakralparasit. Präparat des pathologischen Instituts Heidelberg.

zur Erklärung der parasitären Doppelbildungen die Marchand-Bonnetsche Theorie angenommen, welche seine Theorie von einer versprengten oder ausgeschalteten Blastomere herleitet. Ich glaube aber, daß für die einfacher gebauten teratoiden Geschwülste auch eine spätere teratogenetische Terminationsperiode denkbar ist. Das habe ich an anderer Stelle ausreichend auseinandergesetzt.

3. Einzelmißbildungen. Die Scheidung der Einzelmißbildungen in Mißbildungen der äußeren Form und Mißbildungen der einzelnen Organe und Organsysteme ist mehr eine praktisch notwendige als sachlich begründete. Fast alle Mißbildungen der äußeren Form treffen mehr als ein einzelnes Organ oder Organsystem. Die Polydactylie zeigt z. B. nicht nur Mißbildungen des Skeletts, sondern auch solche der Muskeln, der Haut und ihrer Anhangsorgane, Cyklopie betrifft nicht nur das Auge, sondern auch das Zentralnervensystem, Schädel, Riechorgan, äußere Körperbedeckung. Es liegt in der Natur der Sache, daß eine Mißbildung leicht sowohl unter den Anomalien der äußeren Form wie denen der einzelnen Organe aufgezählt werden kann. Hier ist es bei dem äußerst beschränkten Raum nur möglich, einige Mißbildungen aufzuzählen und einige Bemerkungen anzuschließen, auf Vollständigkeit kann dieser Artikel naturgemäß keinen Anspruch machen.

3a) Mißbildungen der äußeren Form. Von Mißbildungen des ganzen Körpers sind zuerst der Riesenwuchs und Zwergwuchs zu nennen. Es sind das vortreffliche Beispiele, wie das Normale gleitend, ohne feste Grenze, zur Anomalie, zur Mißbildung übergeht. Es ist experimentell gelungen bei niederen wirbellosen Tieren durch Verschmelzung Riesenbildungen, andererseits aus den Einzelblastomeren der ersten Teilungsstadien — also durch Verkleinerung des Eimaterials — Zwergbildungen zu erzeugen. Auf die Wirbeltiere dürfen wir diese Resultate natürlich nicht ohne weiteres übertragen.

Fig. 38. Schematische Größenvergleichung zwischen dem Riesen Thomas Hasler und der Zwergin Miss Millie. Nach Bollinger aus Ranke.

Als embryonale Mißbildungen der Gesamtform müssen die sogenannten „abortiven" Mißbildungen bezeichnet werden, auch lassen sich hier die Mißbildungen der Eihäute, namentlich des Amnions anschließen.

Zu erwähnen ist ferner an dieser Stelle der Situs inversus viscerum totalis. Man findet bei sonst völlig normalen Menschen die Thorax- und Abdominalorgane spiegelbildlich gegenüber der Norm gelagert, die Herzspitze ist rechts, Milz rechts, Leber links usw. Genügend erklärt ist der spontane Situs inversus noch nicht, experimentell konnte Spemann durch Umkehrung eines Stückes Medullarplatte oder

Rückenplatte in sehr frühem Embryonalstadium bei Rana esculenta Situs inversus erzeugen. Es geht daraus hervor, daß der Situs viscerum im Stadium des befruchteten Eies oder der ersten Furche noch nicht unveränderlich festgelegt sein muß, wenn auch in der Regel wohl im befruchteten Ei nach der Mosaiktheorie die Lage der Organe schon bestimmt sein dürfte. Jedenfalls müssen wir dem Situs inversus totalis eine sehr frühe Terminationsperiode zuschreiben. Es ist möglich, daß der Situs viscerum partialis durch die Terminationsperiode sich von dem totalen Situs inversus unterscheidet.

Eine eigenartige Verbildung der Körperform ist bei Hühnerembryonen als Omphalocephalie beschrieben worden. Hier befindet sich der Kopf an der Spitze des Embryo, der Kopf ist ventralwärts, nach dem Dotter zu abgeknickt. In neuerer Zeit hat sich namentlich Rabaud mit diesem von Dareste aufgestellten Typus beschäftigt, von Deutschen Kästner. Beide Forscher sind hinsichtlich der Genese nicht einer Ansicht.

Von den Mißbildungen des Kopfes erwähne ich zunächst die Acranie, die mit Exencephalie verbunden ist. Die Mißbildungen des Gesichts sind mannigfach. Ich beschränke mich auf die Anführung der Cyklopie und der Spaltbildungen des Gesichts,



Fig. 39. Acranie.

insbesondere der Hasenscharten. Die Cyklopie ist durch ein mehr oder weniger einheitliches Auge ausgezeichnet. Meist ist die Orbita einfach, an dem in der Orbita gelegenen Auge läßt sich aber ein größerer oder geringerer Grad von Doppeltsein unschwer erkennen. In der Regel findet sich über dem Auge ein rüsselförmiges Organ, das einem Nasenrudiment entspricht, ohne Anschluß an das Gehirn oder die Rachenhöhle zu haben. Ein medianer Gehirndefekt mehr oder weniger ausgedehnt ist charakteristisch für Cyklopie. Dieser mediane Defekt betrifft stets das Riechhirn, dadurch gewinnt die Cyklopie Beziehungen zu der Arrhinencephalie. Es läßt sich eine fortlaufende Reihe vom Normalen durch verschiedene Formen der Arrhinencephalie bis zur höchstgradigen

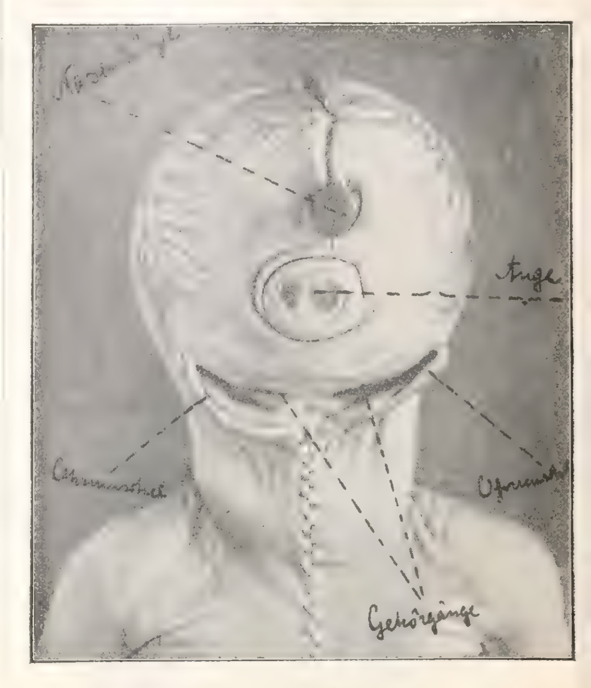


Fig. 40. Synotie und Cyclopie.

Cyklopie aufstellen. Die Cyklopie läßt sich als ein — schematisch gesprochen — kreisförmiger Defekt des Gesichts vorstellen. Künstlich ist Cyklopie von Spemann erzeugt worden.

Die Spaltbildungen des Gesichts lassen sich in atypische und typische sondern. Für die ersteren mag amniogene Entstehung angenommen werden, die typische Hasenscharte könnte gelegentlich auch amniogen sein, ist es jedenfalls aber in ihrer großen Mehrzahl nicht. Die Tatsache der wiederholt beobachteten Vererbung legt innere Ursachen nahe. Die typische Hasenscharte ist ein lateraler Lippenspalt, oft mit Kiefer- und Gaumenspalte (Wolfsrachen) verbunden. Der Spalt der Lippe sitzt lateral am Philtrum. Oft ist die Hasenscharte beiderseitig. Mediane Hasenscharten sind selten. Die formale Genese der typischen Hasenscharte ist als Hemmungsbildung aus der normalen Entwickelungsgeschichte zu verstehen.

Von den Mißbildungen des Halses sei nur kurz der Fistula colli congenita gedacht. Etwas ausführlicher müssen wir bei den

Mißbildungen des Rumpfes verweilen. Hier sind die wichtigsten die Spaltbildungen des Rumpfes, die sich entweder an der Rückenseite oder an der Bauchseite befinden können. Die ersteren bilden die große Gruppe der Rachischisis, Spina bifida, Cranioschisis und Encephalocele. Die sogenannten Spaltbildungen der vorderen Leibeswand sind dagegen nicht minder mannigfaltig. Es gehören hierher die Fissura thoracis, Fissura sterni, die Bauchspalten, Bauchbruch, Nabelbruch und Nabelschnurbruch, Blasenspalte und Epispadie. Die Gruppe der Rachischisis ist dadurch gekennzeichnet, daß die Wirbelsäule und der Schädel



Fig. 41. Totale Rachischisis.

entweder auf ihrer ganzen Ausdehnung oder an einer zirkumskripten Stelle einen Spalt in der hinteren Schließungslinie erkennen lassen. Regelmäßig ist damit eine Mißbildung des Zentralnervensystems verknüpft, auf die wir noch zurückkommen werden. Rachischisis und Spina bifida bedeuten im Grunde dasselbe, nämlich Spaltung der Wirbelsäule, doch hat man vielfach die Gewohnheit angenommen, unter Rachischisis die nicht cystischen Formen, unter Spina bifida die cystischen Formen zu verstehen. Die Cystenbildung wird durch Flüssigkeitsansammlung in den Höhlen oder im Zentralkanal des Zentralnervensystems bedingt. Bei der totalen Rachischisis ist sehr häufig eine eigenartige Haltung des mißbildeten Fetus zu beobachten. Der Kopf scheint nach hinten zurückgebeugt, der Hals verkürzt. Bei der regelmäßig gleichzeitig bestehenden Acranie und Hemicephalie treten die Augen froschartig hervor. Es sind diese Mißbildungen die sogenannten Krötenköpfe des Volksmundes. Es läßt sich eine Reihe



Fig. 42. Hemicephalie mit Rachischisis (sogenannte Uranoskopie).

von diesen hochgradigsten Mißbildungen bis zu der sogenannten Spina bifida occulta aufstellen, bei welcher eine Mißbildung des Zentralnervensystems nicht vorhanden sein muß, vielmehr nur ein Defekt an der hinteren Seite eines Wirbelbogens. Aeußerlich dokumentiert sich eine Spina bifida occulta, die fast stets in der Lendengegend sich vorfindet durch eine Hypertrichose, eine übermäßige Behaarung, die mitunter als ein schwanzähnlicher kleiner Anhang imponieren kann. Manche von den sogenannten Schwanzmenschen gehören zu dieser Gruppe der Mißbildungen, doch sei bemerkt, daß, wenn auch sehr selten, etwas bedeutendere Schwanzanhänge, die Knorpel enthalten können, beim Menschen vorkommen. Die vorhin genannten Mißbildungen der vorderen Schliessungslinie des Rumpfes lassen sich hinsichtlich ihrer Abstufung ebenfalls in eine Reihe bringen von der totalen vorderen Rumpfspalte an bis zum kleinen Nabelschnurbruch des Neugeborenen. Die Ektopie der Eingeweide wird sich nach der Ausdehnung der vorderen Rumpfspalte richten müssen, am häufigsten finden wir die Leber in Bauchbrüchen. Kurz erwähnt sei Schizosoma reflexum, das gewissermaßen als eine totale Spalte der vorderen Rumpfschließungslinie, verbunden mit einer Rückwärtskrümmung der Körperachse, bezeichnet werden kann.

Hinsichtlich ihrer formalen Genese lassen die Mißbildungen des Rumpfes nach Kermauner einige gemeinsame Aussagen zu. Die teratogenetische Terminationsperiode

muß nach ihm im allgemeinen in den Anfang der dritten Embryonalwoche beim Menschen verlegt werden. Hinsichtlich der formalen Genese sagt derselbe Autor, daß es sich um eine Störung der Wachstumsintensität (in erster Linie Hemmung, in zweiter Linie Exzeß) und der Wachstumsrichtung im Gebiet der Membrana reuniens, des ersten mesodermalen Blastems der Körperwandungen handelt. Als zweites wesentliches Moment bezeichnet derselbe Autor die metamere Anordnung aller typischen Mißbildungen des Rumpfes, als dritte endlich die bilateral symmetrische Anordnung der Defekte. Hinsichtlich der kausalen Genese kommt er zu dem Resultat eine amniogene Entstehung jedenfalls abzulehnen, soweit es sich um typische Mißbildungen handelt. Bei niederen Wirbeltieren sind Mißbildungen, die in die Gruppe der Rachischisis gehören, z. B. von Hertwig durch chemische Einflüsse erzeugt worden.

Die Mißbildungen der Extremitäten sind verhältnismäßig häufig. Es versteht sich schon aus der Entwickelungsgeschichte der Extremitäten, daß auch hinsichtlich der Mißbildungen weitgehende Analogien zwischen oberen und unteren Extremitäten vorhanden sein werden. Auch hier sehen wir von einer genetischen Einteilung ab und zählen rein nach morphologischen Gesichtspunkten einige der hauptsächlichsten Mißbildungen auf. Da sind zunächst die Defektbildungen zu nennen, die entweder eine ganze Extremität oder einen Teil derselben betreffen können, die entweder gleichzeitig und oft symmetrisch an allen vier Extremitäten auftreten können, oder nur ein Paar, obere oder untere Extremitäten oder endlich nur eine einzige Extremität betreffen können. Bei diesen Defekten kann entweder alles, was distal von einem bestimmten Punkte liegt, fehlen oder es können einzelne Skeletteile mit den entsprechenden Weichteilen aus der Kontinuität der Extremität defekt sein, z. B. Radiusdefekt. Defekte, die etwa von der Mitte des Oberarms oder Oberschenkels distalwärts sich fortsetzen, können amniogene Amputationen darstellen. Keineswegs aber ist die Mehrzahl dieser Defekte amniogener Natur. Verwachsungen und Spaltbildungen kombinieren sich oft mit Defekten, auch eine Ueberzahl kann mit Defektbildungen an anderer Stelle verbunden sein. Eine eigene charakteristische Gruppe von Mißbildungen wird durch die sogenannten Sirenen, von denen man mehrere Formen unterschieden hat, dargestellt. Es handelt sich um Mißbildungen der unteren Extremität, um Sympodien, von denen die verschiedensten Grade unterschieden werden. Bolk hat zur Erklärung dieser wie auch anderer Mißbildungen die Segmentaltheorie, Skerozonie, der Extremitäten herangezogen. Als Phokomelie wird eine Mißbildung bezeichnet, bei welcher man den Eindruck gewinnt, daß Hände und Füße direkt an den Schultern ansitzen. Es handelt sich hierbei also vor allem um Defekte der langen Röhrenknochen. Die bekannteste und vielleicht auch wichtichste Mißbildung der Extremitäten ist die Polydaktylie, die Mehrfingrigkeit. Sie als atavistische Mißbildung anzusehen, ist beim Menschen aus vergleichend anatomischen Gründen unmöglich. Experimentell ist erwiesen, daß es sowohl eine regenerative, wie eine Polydaktylie aus Keimesvariation gibt. Ueber die Vererblichkeit ist schon im allgemeinen Teil das Nötige gesagt.

3b) Mißbildungen der einzelnen Organe und Organsysteme. Bei der Beschreibung der Mißbildungen der einzelnen Organe gehen wir naturgemäß auswählend vor. Allgemein kann gesagt werden, daß die Mißbildung eines Organs bestehen kann in teilweisem oder vollständigem Defekt, in Ueberschußbildung, sei es daß eine Vermehrung des normal einfachen Organs vorhanden ist (in einem Fall wurden 400 Nebenmilzen gefunden), sei es daß Vergrößerung des ganzen Organs oder eines Organteiles da ist. Weiterhin kann Mißbildung durch abnorme Form, z. B. abnorme Spalten, abnorme Lappung zustande kommen, es können die Lagebeziehungen des Organs zu seinen Hilfsorganen oder abhängigen Organen (Gefäßen, Nerven, Ausführungsgang von Drüsen) geändert sein, oder die Lage des ganzen Organs ist abnorm, die Beziehungen zu den Nachbarorganen völlig regelwidrig. Endlich kommen Aenderungen des Baues, Gewebsverschiebungen innerhalb eines Organs in Betracht.

Die wichtigsten Mißbildungen des Herzens sind die sogenannten angeborenen Herzfehler, d. h. Abnormitäten der Klappen, der Ostien, sowie die Septumdefekte; Ostiumanomalie und Septumdefekt treten häufig miteinander kombiniert auf und machen zusammen den Symptomenkomplex des angeborenen Herzfehlers aus, wie ihn der Kliniker wohl kennt.

Der häufigste angeborene Herzfehler ist die Stenose des Ostiums der Arteria pulmonalis. Es kann die Pulmonalis so verengt sein, daß nur eine Borste durch die Oeffnung geführt werden kann, auch völlige Atresie kommt vor. Man hat bei diesem und bei anderen angeborenen Klappenfehlern über die formale Genese gestritten. Schaden infolge fetaler Endocarditis — oder Entwickelungsstörung lautet die Fragestellung. Nicht alle angeborenen Pulmonalstenosen dürften einheitlich zu beurteilen sein. Daß fetale Endocarditis vorkommt, dafür hat sich auch Herx-

heimer, der die Herzmißbildungen in meinem Handbuch bearbeitete, ausgesprochen. In der Regel aber kombiniert sich die Pulmonalstenose mit Septumdefekt. Dieser ist eine Hemmungsbildung und hat mit fetaler Endocarditis nichts zu tun und „zwingt zu dem Schlusse, daß es sich in der überwiegenden Mehrzahl der Fälle um Entwickelungshemmung handelt" (Herxheimer). Der Septumdefekt bei Pulmonalstenose wirkt namentlich in Verbindung mit Persistenz eines funktionierenden Ductus arteriosus Botalli insofern kompensierend, als er eine Umgehung der Pulmonalis erlaubt. Freilich wird stets Lunge und Körper nur gemischtes Blut erhalten können.

Die Septumdefekte werden wir nach der Lokalisation in Defekte des Vorhofsseptums und des Ventrikelseptums einteilen. Häufig ist ein Defekt des unteren Teils des Vorhofsseptums mit Defekt des oberen Teils des Ventrikelseptums verbunden, ein Befund, der durch die Entwickelungsgeschichte als Hemmungsgliederung des Septum intermedium erklärt wird. Der nicht seltene Defekt des Septum membranaceum der Ventrikelscheidewand entsprechend dem Foramen Panizzae bei Crocodiliern ist eine Hemmungsbildung der Scheidewand des Bulbus arteriosus. Man hat diese Mißbildung als „atavistisch" bezeichnet, sie ist ein Beispiel dafür, daß solche atavistische Mißbildungen mit Rekapitulation der Phylogenese durch die Ontogenese zusammenhängen. Die späteste Terminationsperiode der Septumdefekte hat das offene Foramen ovale, das bekanntlich erst mit der Geburt seine Funktion einstellt. So ist es nicht wunderbar, daß kleine Oeffnungen an der Stelle des Foramen ovale sehr häufig sind, während ein völlig offenes Foramen ovale erheblich seltener erscheint. — In Zusammenhang mit den Mißbildungen des Herzens ist die Transposition der großen arteriellen Gefäße zu erwähnen, ein Befund also derart, daß Aorta und Pulmonalis ihren Ursprungsort miteinander vertauscht haben. Mit dieser Transposition sind häufig komplizierte Mißbildungen des Herzens verbunden, es ist unmöglich, hier auf die interessante Entwickelungsgeschichte dieser Mißbildungsgruppe einzugehen.

Andere Mißbildungen des Herzens sind seltener und weniger wichtiger, ich erwähne noch die Dextrocardie, die Ectopie, die sich mit Fissura sterni verbindet, die Verlagerung bei Situs viscerum totalis und partialis, Vermehrung oder Verminderung der Semilunarklappen. Sehr eigenartige Mißbildungen sind durch Vermehrung der Herzzahl gegeben. Verocay fand bei einem Huhn sieben Herzen.

Anomalien im Venensystem ebenso wie im Arteriensystem ergeben enge Beziehungen zu den Varietäten.

Die Mißbildungen des Respirationstraktus sind von minderer Wichtigkeit als die des Herzens. Völliger Defekt einer

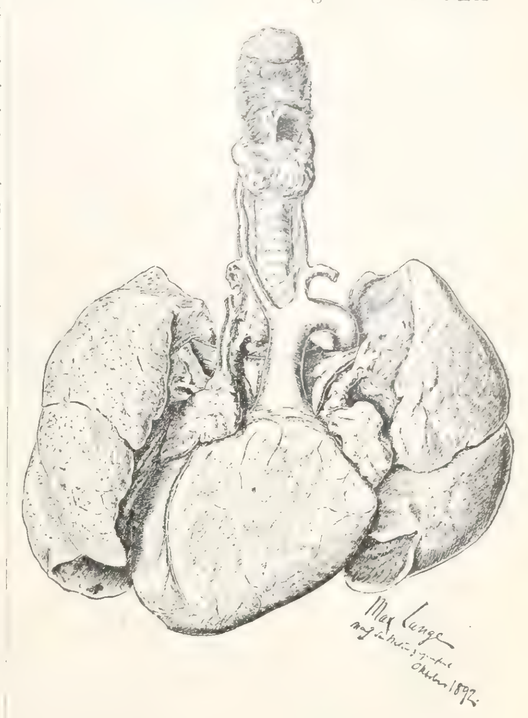


Fig. 43. Dextrocardie beobachtet bei einem 46 jährigen Mann. Links sieht man die zweilappige, rechts die dreilappige Lunge. Nach vorn liegt der mit einer Tricuspidalklappe versehene arterielle Ventrikel, aus dem die über dem linken Hauptbronchus nach abwärts gehende Aorta entspringt. Hinter der Aorta die sehr weite und dünnwandige Arteria pulmonalis, die aus dem nach hinten gelegenen mit einer Mitralklappe versehenen venösen Ventrikel entspringt. Nach Lochte.

Lunge mit entsprechenden Defekten der Bronchien und Gefäße kommt vor, ist aber selten. Ebenso ist eine „Nebenlunge" nicht häufig, sie ist, wenn vorhanden, meist ein kleiner Lappen mit eigenem Bronchus, in der Regel atelektatisch. Häufig ist abnorme Lappung einer oder beider Lungen, doch ist diese Mißbildung ohne Bedeutung. In der Trachea kommen Divertikel vor, Fistelbildungen finden sich zum Oesophagus. In ganz seltenen Fällen findet man Atresie des Kehlkopfs, eine Diaphragmabildung im Kehlkopf ist als Mißbildung beschrieben. Bei lebensunfähigen Mißbildungen kann der ganze Respirationstraktus fehlen.

Die Mißbildungen des Darmes sind vor allem durch Atresie, Stenose gekenn-

zeichnet. Schon am Oesophagus finden wir als die wichtigste Mißbildung die Atresie des Oesophagus, den vollkommenen Verschluß, der selbstverständlich die Fortdauer des extrauterinen Lebens unmöglich macht. Oftmals kann man eine Verbindung des atretischen Oesophagus mit der Trachea feststellen, was sich entwickelungsgeschichtlich erklärt. Am M a g e n kommt angeborene Sanduhrform vor. Die angeborene Pylorusstenose kann nicht hierher gerechnet werden, da es sich bei dieser nicht seltenen Affektion kleiner Kinder um einen Spasmus handelt, bei dem freilich sekundär eine Hypertrophie der Muskulatur eintreten kann. Im Darmkanal können sich Atresien an den verschiedensten Stellen finden. Im D u o d e n u m ist eine gewisse Prädilektionsstelle die Einmündung der Gallengänge. Multiple Atresien, namentlich des D ü n n d a r m s kommen vor. Ich habe einen Fall gesehen, der von K u l i g a veröffentlicht wurde, in welchem auf eine atretische Stelle wieder eine Stelle mit normalem Lumen folgte, dann wieder eine Atresie, so daß geradezu eine rosenkranzähnliche Figur des Dünndarms herauskam. Genetisch wird eine Entwickelungshemmung in Betracht gezogen, jedenfalls ist die Annahme der fetalen Peritonitis zurückzuweisen. Die häufigste Atresie ist am Enddarm gelegen und bildet die Mißbildungsgruppe der A t r e s i a a n i u n d r e c t i. Es können Verbindungen des Rektums durch fisteláhnliche Gänge mit verschiedenen Stellen der äußeren Haut oder auch mit der Blase oder der Urethra bestehen. In diese Gruppe der Atresia ani gehört auch der Befund der sogenannten persistenten Kloake. Hierbei finden wir einen gemeinsamen Hohlraum, in den das Rektum sich verfolgen läßt und andererseits auch der Sinus urogenitalis aufgeht. Diese verschiedenen Mißbildungen sind aus fehlerhafter Entwickelung der Kloake zu verstehen und unterscheiden sich teilweise durch die teratogenetische Terminationsperiode. Doch lassen sich nicht alle verschiedenen Formen der Atresia ani und recti als reine Hemmungsbildungen auffassen, vielmehr sind manche Oeffnungen des atretischen Rektums nur durch eine ganz abnorme Kanalbildung zu verstehen, ebenso wie bei Atresia ani ein normalerweise nicht vorkommender Bindegewebsschluß der Afteröffnung nachweisbar ist. Außer den Atresien des Darmkanals sind namentlich die D i v e r t i k e l b i l d u n g e n zu erwähnen, die ebenfalls vom

Fig. 44. Multiplicitas cordis (Heptocardie) bei einem Huhn. H Leber. L Milz. Pc Pericardien (gesondert für jedes Herz) Nach Verocay.

Oesophagus bis zum Enddarm hin eine bedeutsame Rolle spielen. Freilich ist nicht jede Divertikelbildung angeboren. Als häufigstes, sicher als Hemmungsbildung aufzufassendes Divertikel sei das Meckelsche Divertikel genannt, das dem Ansatz der Ductus omphalo-entericus entspricht. Auch die

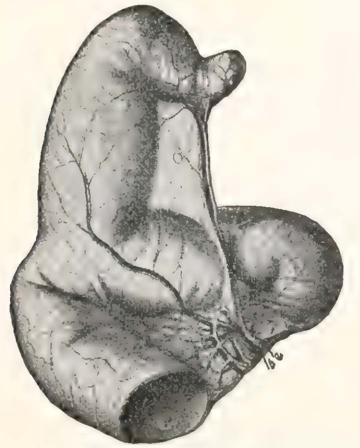


Fig. 45. Meckelsches Divertikel mit erhaltenen Dottergefäßen. Nach Wilber.

Brüche müssen in diesem Zusammenhang erwähnt werden, da mindestens zu der weitaus überwiegenden Mehrzahl der Brüche eine Entwickelungsstörung gehört. So sehen wir, daß der häufigste Bruch, die äußere Leistenhernie, sich bei offenem Processus vaginalis des Bauchfelles bildet. Und nicht nur gehört in diesem Falle ein offener Bruchkanal als Mißbildung zum Zustandekommen der Hernie, vielmehr müssen wir auch die abnorme Länge der Mesenterien, die oftmals mit Mesenterialmißbildungen verbunden ist, als angeborene Anomalie ansehen. Diese Anomalie finden wir nicht nur beim Leistenbruch, sondern auch bei anderen Arten von Brüchen. Die sogenannten retroperitonealen Brüche benutzen als Bruchpforte die sogenannten Recessus. Wir haben allen Grund anzunehmen, daß die abnorme Weite der Recessus, die derartige Brüche zuläßt, kongenital ist. Die linksseitigen retroperitonealen Brüche im Processus venosus werden als Treitzsche Hernien bezeichnet. Die angeborenen Zwerchfellsbrüche setzen fast immer einen kongenitalen Defekt des Zwerchfells voraus. Die linksseitigen sind weit häufiger als die rechtsseitigen Brüche. Es findet sich dabei in der linken Bruchhöhle ein Teil der Baucheingeweide, die Brustorgane sind verdrängt.

Mißbildungen der Leber sind in schwerer Form nicht häufig, abgesehen von lebensunfähigen Mißbildungen. Die Gallenwege können ganz oder teilweise fehlen.

Von Pankreasanomalien ist das akzessorische Pankreas hervorzuheben, solche Bildungen kommen mitunter multipel vor. Sie sind nicht als wahre Verlagerungen, sondern vielmehr als Fehlentwickelungen aufzufassen. Von Mißbildungen der Milz, die hier anhangsweise erwähnt seien, ist der Defekt bemerkenswert, außerdem kommt die schon erwähnte Nebenmilz häufig vor.

Verhältnismäßig häufig und darum auch von Wichtigkeit sind die Mißbildungen der Niere. Defekt einer Niere, sowie Verlagerung einer Niere besitzen, trotz ihrer funktionellen Bedeutungslosigkeit für den Gesamtkörper, doch große praktische Wichtigkeit für den Arzt. Nicht selten ist die Hufeisenniere, bei welcher in der Regel die unteren Pole beider Nieren durch eine Substanzbrücke miteinander in Verbindung stehen, seltener ist dasselbe bei dem oberen Pol der Fall. Das Becken ist bei der Hufeisenniere ebenso wie in der Regel bei den tiefgelagerten Nieren nach vorn verschoben, die Gefäßversorgung hier wie bei Tieflagerung eine mehrfache. Nicht selten ist doppelter Ureter.

Die Mißbildung der männlichen Geschlechtsorgane werden wir in solche der äußeren und inneren Geschlechtsorgane sondern. Von den wichtigeren Mißbildungen der äußeren Geschlechtsorgane muß die Hypospadie, das Offenbleiben des Sinus urogenitalis erwähnt werden, gewissermaßen das Gegenstück zu der schon erwähnten Epispadie. Durch die ausgesprochene Hypospadie kommt eine Aehnlichkeit der männlichen, äußeren Geschlechtsorgane mit den normalen weiblichen Geschlechtsorganen zustande, wie auf der anderen Seite durch Hyperplasie die Clitoris in ausgebildeten Fällen sich außerordentlich penisähnlich darstellen kann und der Eindruck erweckt werden kann, daß man es mit Geschlechtsorganen des anderen Geschlechts zu tun hat. Es sind das die Zustände des Pseudohermaphroditismus. Man unterscheidet Pseudohermaphroditismus masculinus und femininus und wählt die Zusätze masculinus und femininus nach der Beschaffenheit der Keimdrüsen. Bei Pseudohermaphroditismus masculinus finden wir also ein Individuum mit männlicher Keimdrüse und anscheinend weiblichen Geschlechtsorganen. Bemerkenswert ist, daß die sogenannten sekundären Geschlechtscharaktere, Haarwuchs, Beschaffenheit der Mamma, überhaupt Körperbau, bei Pseudohermaphroditismus sich oft dem anderen Geschlecht nähern. Echter Hermaphroditismus, daß heißt gleichzeitiges Vorhandensein einer männlichen und weiblichen Keimdrüse kommt bei Säugetieren und auch beim Menschen mit Sicherheit vor, ist jedoch sehr selten.

Von den Mißbildungen der weiblichen Geschlechtsorgane sind wichtig und entwicklungsgeschichtlich höchst interessant die Mißbildungen des Uterus, die auf einer mangelhaften Aneinanderlagerung oder mangelhaften Verschmelzung der Müllerschen Gänge beziehentlich einer Kombination dieser beiden Möglichkeiten beruht. Auch die postembryonalen Hemmungsbildungen, so der Uterus infantilis, dürfen als vorzügliches Beispiel postembryonaler Hemmungsbildungen erwähnt werden.

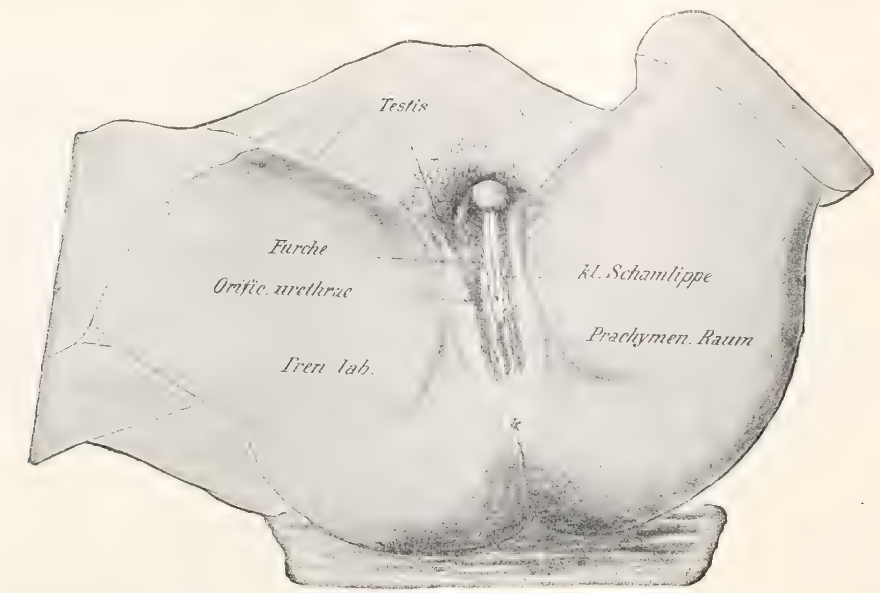


Fig. 46. Pseudohermaphroditismus masc. ext. (Hypospadia penis scrotalis).



Fig. 47. Sogenannter Pseudohermaphroditismus fem. ext. u Urethra v Vagina. Nach Hofmann.

Die Mißbildungen des Zentralnervensystems sind insofern von ganz besonderer Bedeutung, als vielleicht auf keinem anderen Gebiete so klar hervortritt, wie für die Erkenntnis des Normalen die Untersuchung der Mißbildungen die wichtigsten Beiträge zu liefern vermag. Wir erwähnten schon die Spina bifida. Die Mißbildungen des Zentralnervensystems, die sich bei der Raschischisis und Spina bifida finden, können als Amyelie, Myelocele, Myelomeningocele, Myelocystocele bezeichnet werden. Vielfach analoge Unterschiede lassen sich auch am Schädel bezw. Gehirn treffen.

Sehr mannigfaltig sind die Formen der Aencephalie und Exencephalie. Da ein besseres Verständnis dieser Mißbildungen ohne nähere Ausführungen nicht zu vermitteln ist, so muß ich mich mit der Aufzählung begnügen. Bei Spina bifida finden wir häufig auch fern vom Ort der Wirbelspaltung Mißbildungen des Zentralnervensystems, die keinen unmittelbaren Zusammenhang mit der Spina bifida besitzen, doch aber gerade hierbei besonders häufig gefunden werden. So konnte bei Spina bifida lumbosacralis im Gebiet des Halsmarks, der Medulla oblongata, des Kleinhirns mit ziemlicher Regelmäßigkeit eine typische Mißbildung festgestellt werden, die Arnold-Chiarische Mißbildung, bei der eine Abknickung und Verschiebung der Medulla oblongata und von Kleinhirnteilen statt hat. Daß bei Cyklopie eine Mißbildung des Großhirns typisch ist, wurde schon erwähnt. Mit der

Gehirnmißbildung bei Cyklopie und Arrhinencephalie kann Balkenmangel zusammenhängen. Defekte im Großhirn werden als Porencephalie bezeichnet. Diese ist häufig verbunden mit Microgyrie Kleinheit der Hirnwindungen. Microcephalie, eine Kleinheit des Großhirns, die freilich nicht alle Teile gleichmäßig betrifft, findet sich bei Idiotengehirnen. Als zufälliger Befund wird bei mikroskopischen Untersuchungen im Gebiet des Zentralnervensystems oft eine mehr oder weniger ausgedehnte Heterotopie gefunden, die naturgemäß namentlich häufig bei schweren Gehirnmißbildungen ist. So kann zum Beispiel ein Olivenkern sich viel weiter dorsal befinden als normal.

Mißbildungen des Skelettsystems sind nicht selten. Hier kommt namentlich die Unterscheidung gegenüber fetalen Krankheiten vom allgemeinen teratologischen Gesichtspunkt in Betracht.

Im Muskelsystem sind vor allem die Defekte interessant (Defekt des Pectoralis). Daß die Haut als das Organ, das den ganzen Körper überkleidet, bei sehr vielen Mißbildungen mit affiziert ist, liegt auf der Hand. Die Gewebsmißbildungen der Haut zeigen enge Beziehungen zur Geschwulstlehre. Hingewiesen sei auf die Mißbildungen der Geweihe bei Hirschen. Bei den Mißbildungen der Haut muß auch auf die überzählige Mamma, beziehentlich auf die Vermehrung der Brustwarzen hingewiesen werden, Polymastie und Polytelie. Die Stellen, an denen sich überzählige Brustwarzen finden, sind durch die Milchleiste gekennzeichnet. Oft sind Nävi mit überzähligen Brustwarzen verwechselt worden, deshalb sei insbesondere hervorgehoben, daß überzählige Brustwarzen niemals behaart sein können.

4. Anhang. Bemerkungen über Mißbildungen der Wirbellosen und der Pflanzen. Nach diesem äußerst kurzen Ueberblick der Mißbildungen, bei welchen die Mißbildungen der Wirbeltiere, insbesondere der Säugetiere und des Menschen zugrunde gelegt wurde, sei, wenn auch nur in gedrängtester Zusammenfassung noch auf die natürlich vorkommenden Mißbildungen bei Wirbellosen Bezug genommen. Im allgemeinen Abschnitt wurde schon auf die zahlreichen experimentell herstellbaren regenerativen Mißbildungen der Wirbellosen gedeutet. Das Experiment hat gezeigt, daß sehr viele in der Natur vorkommende Mißbildungen der Wirbellosen als regenerativ aufzufassen sind. Ausführliche Literatur findet man bei Przibram. Doppelbildungen mehr oder weniger vollständig sind bei den verschiedensten Klassen der Wirbellosen gelegentlich als spontane Mißbildungen getroffen worden, so unter den Protozoen bei Stentor und Orbitolites. Schon im 18. Jahrhundert waren Doppelbildungen von Hydroidpolypen bekannt, wie ja die Hydra von jeher ein beliebtes Experimentalobjekt gewesen ist und daher auch viel beobachtet wurde. Anderweitige Doppelbildungen finden wir bei Cölenteraten, Mißbildungen der Tentakel bei Aktinien, und viele durch das Experiment als regenerativ bewiesene Mißbildungen bei Hydra und verwandten Formen. Die bei Echinodermen gefundenen Mißbildungen sind, wie Przibram ausführt, ebenfalls meist regenerativ, so die von Lütken gesehene Bifurkation von Armen bei Seesternen u. a.

Die verschiedenen Klassen der Würmer zeigen verschiedene Häufigkeit der Mißbildungen, was zum Teil wohl mit der Beobachtungshäufigkeit zusammenhängen mag. Am besten sind die Mißbildungen der Anneliden bekannt, die Verdopplungen, wie sie sich auch experimentell herstellen lassen. Bei Tänien findet man, wie Leunis-Ludwig ausführt, verhältnismäßig häufig Mißbildungen. Bei Arthropoden, sowohl bei Insekten wie auch bei Krebsen findet man eine Verdopplung der Anhänge der Körpersegmente, der Füße nicht selten. Ueber Heteromorphose bei Krebsen wurde schon berichtet.

Die Mollusken zeigen gleichfalls mancherlei Mißbildungen. Bei Oktopus wurden zum Beispiel gespaltene Arme gefunden, bei verwandten Arten überzählige. An den Gehäusen der Schnecken und Muscheln kommen ebenfalls Mißbildungen vor. Bekannt ist eine abnorme Windung der Gehäuse, so daß normal rechts gewundene Schneckenschalen sich links gewunden darstellen oder umgekehrt. Bei Tunikaten ist Bifurkation gefunden worden. Zum Schluß sei erwähnt, daß ebenso wie im Tierreich auch im Pflanzenreich Mißbildungen sich finden, daß aber, wie leicht verständlich, ein direkter Vergleich von pflanzlichen und tierischen Mißbildungen nicht möglich erscheint.

Literatur. ***E. Schwalbe***, *Morphologie der Mißbildungen 1. u. 2. Teil, Jena 1906 bis 1907.* — ***Derselbe***, *in Verbindung mit Andern, Morphologie der Mißbildungen 3. Teil. Die Einzelmißbildungen, Jena 1908.* — ***Marchand***, *Mißbildungen. In Eulenburgs Realenzyklopädie der medizinischen Wissenschaft, Wien 1908 ff. Neueste Auflage im Erscheinen.* — ***Hans Przibram***, *Regeneration. Experimentelle Zoologie 2 Teil, Leipzig und Wien 1909.* — ***Hans Hübner***, *Die Doppelbildungen des Menschen und der Tiere. — Ergebn. der allg. Path. und path. Anatomie. Herausgegeben von von Lubarsch u. Ostertag, 15. Jahrg. 1911.*

E. Schwalbe.

Mitscherlich

Eilhard.

Geboren am 7. Januar 1794 in Jever, Ostfriesland, gestorben am 28. August 1863 in Berlin, wo er seit 1822 als Nachfolger Klaproths wirkte, nachdem er mit linguistischen orientalischen Studien begonnen hatte. Entscheidend für seine künftige Laufbahn wurde sein Verhältnis zu Berzelius, in dessen Laboratorium er 1819 und 1820 arbeitete. Mit der Entdeckung des Isomorphismus von Salzen und damit der Beziehungen zwischen Kristallgestalt und chemischer Konstitution errang Mitscherlich einen bedeutenden Platz in der Wissenschaft. Seine vielseitigen chemischen Forschungen erstrecken sich auf die anorganische wie organische Chemie: Arbeiten über Mangan und über Mangansäure, über Selensäure, Benzol und Abkömmlinge. Höchst wichtige Beobachtungen verdankt man ihm über die künstliche Bildung von Mineralien. Seine Abhandlungen sind gesammelt herausgegeben von seinem Sohne Alexander. Ein originelles Lehrbuch der Chemie erschien 1829.

E. von Meyer.

Möbius

Karl August.

Geboren am 7. Februar 1825 in Eilenburg; gestorben am 26. April 1908 in Berlin. Er studierte in Berlin und nahm 1853 eine Stelle als Lehrer am Johanneum in Hamburg an. 1868 wurde er als Professor der Zoologie nach Kiel berufen und 1887 zum Direktor des Museums für Naturkunde in Berlin ernannt, welche Stellung er bis 1905 inne hatte, wo er die Verwaltungsdirektion niederlegte. Möbius hat sich hauptsächlich dem Studium der niederen Seetiere, vor allem dem der Auster gewidmet und hat eine Reihe von Reisen zum Studium der künstlichen Zucht dieser Tiere an die deutsche, englische und französische Küste gemacht. Als Mitglied der Kommission für wissenschaftliche Untersuchung der deutschen Meere 1870 bis 1871 bearbeitete er in den Jahresberichten dieser Kommission (Berlin 1873 bis 1875) mehrere Klassen der wirbellosen Tiere. Die Fauna der Korallenriffe studierte er als Begleiter der Expedition zum Studium des Venusdurchgangs nach Mauritius und den Seychellen. Ein besonderes Verdienst hat er sich durch die Reorganisierung des Berliner Museums erworben, für welche er auch dem Publikum zugängliche Schauräume einrichtete. Von seinen Werken sind zu nennen: Seine Bearbeitung der Pantopoden für die Wiss. Erg. d. deutsch. Tiefseeexpedit., Valdivia 1902; Anleitungen zu wissenschaftlichen Beobachtungen auf Reisen, Berlin 1888; Die Nester der geselligen Wespen, Hamburg 1856; Die echten Perlen, Hamburg 1857; Neue Seesterne des Hamburger und Kieler Museums, Hamburg 1859; Bau, Mechanismus und Entwickelung der Nesselkapseln, Hamburg 1866; Die Fauna der Kieler Bucht. Mit H. A. Meyer, Leipzig 1865 bis 1873, 2 Bde.; Die Auster und die Austerwirtschaft, Berlin 1871; Der Bau des Eozoon canadense, Kassel 1878; Die Fische der Ostsee. Mit Heincke, Kassel 1883; Die Bildung, Geltung und Bezeichnung der Artbegriffe, Jena 1886; Ueber die Grundlagen der ästhetischen Beurteilung der Säugetiere, Berlin 1900; Die Tierwelt Ostafrikas und der Nachbargebiete. In Deutschostafrika, Bd. 3 u. 4, Berlin 1895 bis 1898.

Literatur: *F. Dahl, Karl August Möbius, Ein Lebensbild mit Schriftenverzeichnis 1905.*

W. Harms.

Mofetten

werden trockene Gasquellen z. B. Kohlensäurequellen genannt (vgl. den Artikel „Vulkanismus“).

Mohl

Hugo von.

Botaniker. Geboren am 8. April 1805 zu Stuttgart, studierte von 1823 bis 1828 in Tübingen Medizin. Für seine botanischen Studien war ein unmittelbar darauf folgender Aufenthalt in München bei Zuccarini, v. Martius u. a. von besonderer Wichtigkeit. 1832 wurde er in Bern Professor der Physiologie, und drei Jahre später Professor der Botanik in Tübingen, wo er am 1. April 1872 starb. Mohl hat auf fast allen Gebieten der Botanik ein überaus anregendes Wirken entfaltet. Zu seinen besonderen Verdiensten gehört, durch eine Anzahl anatomisch-mikroskopischer und histologischer Arbeiten vorbildlich gewirkt zu haben. Im einzelnen sind zu nennen seine Arbeiten über den Bau und das Winden der Ranken und Schlingpflanzen (1827), Ueber die Poren des Pflanzenzellgewebes (1828), worin der Grund zur Erkenntnis von der Struktur und dem Dickenwachstum der Zellmembran gelegt wurde, über den Bau der Palmen (1831), des Cycadeen- und Farnstammes (1832/33), worin zum erstenmal die Entstehung der Gefäße aus Reihen geschlossener Zellen kurz beschrieben und damit die gesamte Pflanzenstruktur auf die Zelle als Grundorgan zurückgeführt wurde, die bahnbrechenden Arbeiten über das Protoplasma, Zellteilung, die Membran, speziell die Cuticula und ihr Verhältnis zur Epidermis (1842, 1845 usw.), über das Periderm und die Entwickelung von Kork und Borke sowie deren Beziehungen zum Rindengewebe (1836). In der 1846 erschienenen Mikrographie sowie in kleineren Aufsätzen hat er den ihn besonders interessierenden Bau und Gebrauch von optischen Instrumenten behandelt. Unter den experimentell-physiologischen Arbeiten seien die entsprechenden Kapitel seiner Vegetabilischen Zelle und die Untersuchungen über das Oeffnen und Schließen der Stomata (1856) erwähnt,

deren Entstehung und Form er schon 1838 erörtert hatte.

Literatur. *De Bary, Botan. Zeitg. XXX, 1872, S. 561.*

W. Ruhland.

Mohr

Karl Friedrich.

Geboren am 4. November 1806 zu Coblenz, gestorben am 28. September 1879 in Bonn, hat sich große Verdienste im Gebiete der anorganischen, besonders analytischen Chemie erworben durch Ausbau der Maßanalyse (Lehrbuch der chemischen Titriermethoden 5. Auflage 1877). Seinen Ideenreichtum und seine Vielseitigkeit hat Mohr durch mehrere von großer Selbständigkeit der Gedanken zeugende Werke betätigt, die aber nur in geringem Maße den Beifall der Zeitgenossen fanden, daher wenig beachtet wurden. Dies gilt namentlich von seiner geologischen Schrift: Geschichte der Erde. Seine physikalisch chemischen Werke: Allgemeine Theorie der Bewegung und Kraft und Mechanische Theorien der chemischen Affinität, enthalten manchen gesunden Keim. Schon im Jahre 1837 hat Mohr sehr klare Vorstellungen über die Einheit und die gegenseitige Umwandelbarkeit der Naturkräfte geäußert. Liebig hatte Mohrs Bedeutung erkannt und gewürdigt, wie aus seinem von Kahlbaum herausgegebenen Briefwechsel (Leipzig 1904) zu ersehen ist.

E. von Meyer.

Moissan

Henri.

Geboren am 28. September 1852 zu Paris, gestorben daselbst am 20. Februar 1907, hat seine bedeutendsten Experimentalarbeiten auf dem Gebiete der anorganischen Chemie ausgeführt, die fast ausschließlich in französischen Zeitschriften veröffentlicht sind. Herauszuheben sind seine umfassenden Untersuchungen von Chrom- und Fluorverbindungen, besonders des Fluors, das er zuerst zu isolieren vermochte und dessen Verhalten er genau feststellte. Seine Versuche, Diamant künstlich zu gewinnen, führten ihn zur vielseitigen Anwendung des elektrischen Ofens, dessen Konstruktion er vereinfachte, und mit dem es ihm glückte, zahlreiche wichtige Verbindungen, wie Carbide, Silicide, Boride und viele Metalle aus ihren Oxyden rein darzustellen (vgl. Le four electrique 1897). Er gab ein ausführliches fünfbändiges Lehrbuch Traité de chimie minérale heraus.

Literatur. *Nekrolog von A. Stock in Ber. 42, 5099.*

E. von Meyer.

Moldavit.

Silikatgläser, welche an der Moldau gefunden wurden, und denen man neuerdings kosmischen Ursprung zuschreibt (siehe den Artikel „Meteoriten").

Moldenhawer

Jakob Paul.

Botaniker, wurde am 11. Februar 1766 in Hamburg geboren. 1791 wurde er Professor der Philosophie in Kiel und Vorsteher der Fruchtbaumschule zu Düsternbrook bei Kiel; er starb am 22. August 1827 zu Kiel. Seiner Schrift Beiträge zur Anatomie der Pflanzen (Hamburg 1812 335 S. 6 Tafeln) gebührt in der Geschichte der Pflanzenanatomie eine bedeutende Stelle; die Darstellung des Baues der Gefäßbündel der Maispflanze und der umgebenden Gewebe ging über das von früheren Beobachtern Geleistete weit hinaus und bildete die Grundlage, für Mohls spätere Werke. Moldenhawer schrieb außerdem ein Tentamen in historiam plantarum Theophrasti (Hamburg 1791).

W. Ruhland.

Molekularkräfte.

1. Kontinuitätstheorie und Molekulartheorie. 2. Kräfte und Energien. 3. Molekularkräfte. Das Gesetz ihrer Wirkung. 4. Ruhende und bewegte Molekeln. Kinetische Theorie der Materie. 5. Verhalten der drei Aggregatzustände. 6. Elastizität der festen Körper. 7. Festigkeit. Spaltung, Adhäsion. 8. Hydrostatik und Kapillarität. 9. Pulverförmige Massen. 10. Erscheinungen in Gasen. 11. Kapillaritätserscheinungen. 12. Die Theorien von Laplace, Gauß, Van der Waals und Bakker. Das Grundgesetz und die Gestalt der Oberfläche. 13. Oberflächenspannung. Randwinkel, Grenzschicht und Wirkungsbereich der Molekularkräfte.

In der Physik (und aller exakten Naturwissenschaft überhaupt) kämpfen von alters her zwei Grundvorstellungen miteinander einen Kampf, der zwar höchst fruchtbar geworden ist für die Weiterentwickelung unserer Kenntnisse und unseres Einblickes in den Zusammenhang der Dinge, im Grunde aber überflüssig erscheint angesichts des Umstandes, daß beide Vorstellungen, so diametral sie auch einander gegenüberzu-

stehen scheinen, doch, eben weil es sich nur um Bilder handelt, die wir uns von der Natur machen, sehr wohl nebeneinander bestehen können, um, je nach Art und Charakter des betreffenden Erscheinungsgebietes, bald die eine, bald die andere, mehr in den Vordergrund zu rücken und ihre jeweiligen Vorzüge geltend zu machen. Die eine ist die Vorstellung des Kontinuums, das Bild der im Raume, wie dieser selbst, stetigen Materie; die andere ist die atomistische, also die Vorstellung, daß die Materie sich nicht wie unsere Raumanschauung verhält, vielmehr wesentlich anders, so nämlich, daß sie immer nur an einzelnen Stellen des Raumes zu finden ist, gleichviel ob diese Stellen nahe beieinander oder weit voneinander entfernt liegen, gleichviel ob die Anordnung im Raume regelmäßig oder unregelmäßig, einfach oder kompliziert, zeitlich konstant oder wechselnd sein möge.

1. Kontinuitätstheorie und Molekulartheorie. Die Kontinuitätstheorie hat den Vorzug, weit einfacher und eleganter zu sein, und das in erster Linie dank dem Umstande, daß sie alle Vorteile zuläßt, die aus dem Begriffe des Stetigen fließen, insbesondere also die Anwendung der Infinitesimalrechnung und alles dessen, was damit zusammenhängt. Die Atomistik führt, wenigstens dem äußeren Anscheine nach, unsere Erkenntnis weiter auf die Wurzeln zurück, nämlich von dem Verhalten endlicher Körper nicht bloß auf das Verhalten geometrisch gedachter Elemente derselben, sondern auf das Verhalten jener physischen Elemente, die man als die Bausteine der Körper ansieht. Liegt schon in der großen Zahl dieser eine Komplikation, in ihrer relativ großen Unabhängigkeit voneinander eine weitere, so wird die Verwickelung noch besonders gesteigert infolge der durch die Erfahrung notwendig gemachte Annahme, daß es hier eine ganze Anzahl von Schritten gibt, die von den endlichen Körpern aus gemacht werden müssen: zu den Molekeln, von diesen zu den Atomen und Ionen und von diesen schließlich zu den Elektronen, von denen freilich auch noch niemand zu sagen vermag, ob sie das allerletzte sein mögen.

2. Kräfte und Energien. Noch in einer ganz anderen Hinsicht besteht in der Naturlehre eine Verschiedenheit, wenn nicht wiederum ein Gegensatz der begrifflich-bildlichen Vorstellung; nur daß dieser Kampf einerseits viel jüngeren Datums und doch andererseits in der Hauptsache abgeschlossen ist; denn der Begriff der Kraft, also der Begriff des Wirkenden, hat in den letzten Jahrzehnten zurückweichen müssen vor dem weit klareren und brauchbareren Begriff des real Seienden, vor dem Begriffe der Energie. Wenn man trotzdem noch heute in der Physik vielfach von Kräften spricht, so ist das weniger eine Sache des Glaubens an eine kausale Darstellung, als eine Sache sprachlicher Bequemlichkeit, und es liegt in der Tat für den, der sich nicht irre machen läßt, kein Grund vor, sich dieser Bequemlichkeit zu berauben. Kraft in diesem Sinne ist also lediglich ein Hilfsbegriff, den man gehen läßt, wenn er seine Schuldigkeit getan hat.

3. Molekularkräfte. Das Gesetz ihrer Wirkung. Es war erforderlich, diese beiden Betrachtungen voranzustellen, um den Titel dieses Artikels „Molekularkräfte" zu motivieren. Denn erstens handelt es sich im folgenden nicht mehr und nicht weniger um Molekularerscheinungen als in sämtlichen übrigen Kapiteln der Physik, und zweitens spielen die Kräfte hier in keiner Hinsicht eine realere Rolle als irgendwo anders. Das einzige, was der Name zum Ausdruck bringen soll und kann, ist dies, daß es sich um Erscheinungen handelt, die sich, zunächst wenigstens, in engem Rahmen, in kleinen Raumteilen abspielen, und daß man sie daher, wenn man das Bild der Kraft benutzt, durch Kräfte darstellen kann, die in der Stetigkeitstheorie den Namen „Nahekräfte", in der Unstetigkeitstheorie aber den Namen „Molekularkräfte" erhalten müssen.

Die hier in Rede stehenden Erscheinungen werden sich für den Beobachter am unmittelbarsten geltend machen an der Oberfläche der Körper, genauer gesagt, an der Grenzfläche zweier oder mehrerer Körper; sie werden die Form dieser Flächen beeinflussen und ihre zeitlichen Aenderungen wesentlich mitbestimmen. Indessen ist es einleuchtend, daß die Wirkung der Molekularkräfte hierbei nicht stehen bleiben kann; mit Rücksicht auf den Zusammenhang aller Materie muß sie sich vielmehr von den Grenzflächen aus in das Innere der Körper verbreiten und den dortigen Zustand sowie seine Aenderungen maßgebend beeinflussen; nur werden sich hier meist gewisse Ausgleiche infolge der allseitigen Raumerfüllung einstellen, und die Erscheinungen werden infolgedessen hier weniger prägnant ausfallen, oder sie werden mehr oder weniger in der Gesamtheit der Erscheinungen aufgehen, die die Materie überhaupt gegenüber äußerer und innerer Beanspruchung darbietet. Immerhin wird man sich von dem hier festgelegten Standpunkte aus als äußerstes Ziel setzen, alle Vorgänge, gleichviel, ob an der Oberfläche oder im Innern, auf Molekularwirkungen aufzubauen und dadurch in ein einheitliches System zu bringen. Dabei sollen im vor-

liegenden Artikel alle spezifischen Erscheinungen von thermischem, elektrischem, magnetischem oder optischem Charakter ausgeschlossen und nur die rein mechanischen betrachtet werden; diese aber natürlich nur insofern als bei ihnen wirkliche Veränderungen der Körper als solcher auftreten, d. h. mit Ausschluß der Bewegung starrer Körper im Raume, für die eine etwaige molekulare Natur der Körper keine Rolle spielt.

Ueber die Natur der Molekularkräfte, insbesondere über das Gesetz ihrer Wirkung, sind die allerverschiedensten Annahmen gemacht worden. Nur in einem Punkte stimmen alle Theorien überein: die Beziehung der Kräfte zu der Entfernung, auf die hin sie wirken, muß mit wachsender Entfernung stark abnehmen; es muß mindestens das aus der Gravitation und aus anderen Gebieten bekannte umgekehrt quadratische Gesetz angenommen, nicht selten aber auch zu einem viel kräftigeren Gesetze gegriffen werden; wie denn z. B. Maxwell die Gastheorie anfänglich auf das Gesetz der umgekehrten fünften Potenz der Entfernung begründet hat. Ferner stimmen die meisten Theorien darin überein, daß die Molekularkräfte vom Charakter der Zentralkräfte sein müssen, d. h. daß sie zwischen zwei Molekeln in deren Verbindungslinie wirken, womit die, prinzipiell natürlich auch möglichen, seitlichen Komponenten ausgeschlossen werden. Am meisten Schwierigkeit macht die Frage, welche Rolle anziehende und welche abstoßende Kräfte spielen; denn daß man beide braucht, darüber kann für den kein Zweifel bestehen, der bedenkt, daß die Körper einerseits mehr oder weniger stark ihren Zusammenhang zu wahren, andererseits aber auch vielfach sich im Raume zu zerstreuen das Bestreben haben. Man muß eben das Gesetz beider verschieden ausgestalten, so daß es möglich wird, zu erreichen, daß unter gewissen Umständen die einen, unter anderen die anderen überwiegen und für das Ergebnis den Ausschlag geben. Am meisten Erfolg haben im allgemeinen bisher die Theorien gehabt, bei denen die besonderen Annahmen über die Natur der Molekularkräfte sich auf ein Minimum oder gar auf Null reduzierten. Und das gibt Anlaß zu einer überaus wichtigen und prinzipiell wie methodisch gleich bedeutsamen Bemerkung. Die Darstellung der Physik durch Molekularkräfte mag in mancher speziellen Hinsicht ein Fortschritt sein; in der Hauptsache aber tut sie das, was man in der makrokosmischen Physik mit aller Macht zu überwinden sucht: sie begründet alles auf die Wirkung von Fernkräften, derselben Fernkräfte, die man in der Elektrik und Magnetik durch die Feldtheorie glücklich beseitigt hat und auch in der Gravitationslehre gern beseitigen möchte. Denn der Umstand, daß die Entfernung, auf die die Molekularkräfte wirken, überaus klein ist, ändert nicht das mindeste an ihrem Charakter als Fernkräfte; und wenn man, um das zu vermeiden, den Aether als das Medium einführt, in das die Molekeln eingebettet sind und das seinerseits nicht molekular, sondern stetig aufgebaut ist, so stellen sich neue Schwierigkeiten ein, die man wahrscheinlich auch durch die neueste, atomistische Theorie der Elektrizität nicht überwinden wird.

4. Ruhende und bewegte Molekeln. Kinetische Theorie der Materie. Ein weiterer Punkt von allgemeiner Wichtigkeit ist die Beschaffenheit und das Verhalten der Molekeln selbst. Ihre Beschaffenheit im allgemeinen gehört nicht hierher; höchstens ist es für die Frage ihrer Kraftwirkungen von Interesse, zu wissen, ob sie punktförmig oder ausgedehnt und, wenn das letztere, ob sie kugelförmig oder von anderer, nach verschiedenen Richtungen verschiedener Gestalt sein sollen; das letztere wird man der Komplikation wegen nur im Notfalle annehmen, wie er z. B. bei den Kristallen, aber auch sonst unter bestimmten Umständen eintritt. Auch die Anordnung der Molekeln im Raume des näheren zu besprechen, ist hier nicht der Ort, obgleich die Frage verschiedentlich herübergreift. Was uns hier aber wesentlich angeht, ist das Verhalten der einzelnen Molekel dem Raume gegenüber. Hier begnügt sich die Chemie, von gewissen moderneren Spezialtheorien abgesehen, mit der Annahme ruhender Teilchen, weil sie damit für die eigentlich chemischen Vorgänge meist auskommt. Für die Physik einschließlich der physikalischen Chemie ist diese Annahme von vornherein undiskutabel aus dem einfachen Grunde, weil die Temperatur der Körper sich nur als kinetische Energie in befriedigender Weise fassen läßt, und weil diese keine andere Quelle haben kann als die Bewegung der Molekeln. So kommt man von der Molekulartheorie zur kinetischen Theorie der Materie. Und daß die Kinese auch wieder ihre Rückwirkung üben muß auf die zwischen den Molekeln wirksamen Kräfte, bedarf keiner weiteren Stütze.

Was nun die Kräfte zwischen den Molekeln selbst betrifft, so wird es sich im einfachsten Falle, nämlich für ruhende, kugelförmige Molekeln, ausschließlich um zweierlei handeln: um das Vorzeichen der Kraft und um ihre Abhängigkeit von der Entfernung. Je nach dem Vorzeichen ist die Kraft eine Anziehungskraft oder eine Abstoßungskraft. Nun ist es klar, daß man

jede von diesen beiden Kräften braucht, die eine, um die Kohäsion der Körper, die andere, um ihre Elastizität begreiflich zu machen. Man muß also entweder zwei gesonderte Kräfte einführen, was offenbar etwas Unbefriedigendes hat; oder man muß eine einzige Kraft von einem derartigen Gesetze einführen, daß sie unter Umständen Anziehungen, unter anderen Abstoßungen hervorruft, genauer gesagt, daß unter gewissen Umständen der anziehende, unter anderen der abstoßende Teil ihrer Wirkung überwiegt; und zwar wird jene für größere, diese für kleinere Entfernungen überwiegen müssen — eine Betrachtung, durch die, wie man sieht, die Frage des Vorzeichens mit der des Entfernungsgesetzes zusammenfließt.

In Hinsicht des Entfernungsgesetzes liegt nun nichts näher, als die Annahme, das Newton sche Gravitationsgesetz für endliche Körper, wonach die Kraft eine Anziehung ist und mit dem Quadrate der wachsenden Entfernung abnimmt, gelte auch für die Bausteine der Körper, die Molekeln; es fragt sich nur, ob diese Annahme ausreicht, um das Verhalten der Körper zu beschreiben. In dieser Hinsicht gehen nun die Ansichten der Autoren weit auseinander; die einen halten das Gesetz für genügend und nur eine besondere Ausgestaltung für erforderlich, Lord Kelvin z. B. in dem Sinne, daß immer gewisse Gruppen von Molekeln in ihrer Wirkung zusammentreten, wobei dann aus dem quadratischen Einzelgesetz ein weit höheres Gesetz der Gruppen entsteht; andere nehmen von vornherein an, daß man das Newton sche Gesetz ergänzen müsse, indem man zu dem reziprok quadratischen Glied ein zweites hinzufügt; noch andere stellen sogleich ein besonderes Gesetz für die Molekularkräfte auf, und in diesem Gesetz kommt entweder die dritte oder die vierte oder die fünfte Potenz der reziproken Entfernung vor; oder es tritt zu der Potenzfunktion noch ein weiterer Faktor vom exponentiellen Typus, der ausdrückt, daß die Kraftwirkung sozusagen in dem Körper absorbiert wird und deshalb auf größere Entfernungen rasch unmerklich wird. Die Literatur über diese Frage ist außerordentlich groß, von Newton bis auf die heutige Zeit hat die Diskussion nicht geruht; und trotzdem kann man nicht sagen, daß sie zu einem irgend befriedigenden Ende geführt hätte, insbesondere, daß es gelungen wäre, den Uebergang von der abstoßenden in die anziehende Wirkung annehmbar darzustellen, solange man die Teilchen als ruhend voraussetzt.

5. Verhalten der drei Aggregatzustände. Geht man aus diesen und den früher angedeuteten Gründen zu bewegten Teilchen über, bewegt auch in einem als Ganzes ruhenden Körper, so kommt zunächst die Art dieser Bewegung in Frage. Da gibt uns nun die Gesamtheit der Erfahrungen sofort einen Fingerzeig für die Klassifikation der Körper je nach ihrem Aggregatzustande; dieser wurde bisher auf Grund der Stetigkeitstheorie durch die Reaktion der Körper gegen äußere Beanspruchung gekennzeichnet, jetzt bietet sich die Möglichkeit einer molekularen Charakterisierung. In den Gasen nämlich darf man den Abstand der Teilchen als so groß ansehen, daß sie keine merklichen Kräfte aufeinander ausüben können; sie werden daher, zumal auch äußere Kräfte, wie die Schwerkraft, einflußlos bleiben, sich geradlinig und gleichförmig bewegen; ausgenommen die hierbei hin und wieder, aber nicht eben häufig eintretenden Fälle, wo zwei Teilchen sich nahe kommen, — die Wahrscheinlichkeit, daß sie wirklich zusammenstoßen, ist nahezu null; alsdann wird sich die Molekularkraft geltend machen und die Teilchen in eine andere Bahnrichtung mit veränderter Geschwindigkeit drängen. So bewegt sich die Molekel in einer zickzackförmigen Bahn durch den Raum hin, sie ist, wie man es sehr bezeichnend ausdrücken kann, nicht seßhaft, sondern nomadisierend. Hinsichtlich des Gesetzes der Molekularkraft hatte Maxwell ursprünglich die fünfte Potenz der reziproken Entfernung angenommen; später hat sich gezeigt, daß man eine Annahme dieser Art überhaupt nicht zu machen braucht, daß man vielmehr die Tatsachen sehr gut ohne sie beschreiben kann. Das weitere hierüber wird in dem Artikel „Kinetische Theorie der Materie" dargelegt.

Ganz anders in Flüssigkeiten und festen Körpern. Zwar bleibt es für die Flüssigkeiten zweifelhaft, ob man die Teilchen noch als nomadisierend oder schon als seßhaft bezeichnen kann, da sie sozusagen aneinander vorbeikriechen; im normalen Zustande wird aber doch diese Bewegung einen geschlossenen Charakter annehmen derart, daß ein Teilchen sich niemals aus einem gewissen, relativ engen Heimatbereiche entfernt, und nur in besonderen Fällen werden Auswanderungen stattfinden, in wirklich großem Maßstabe namentlich bei dem Prozeß, durch den sich die Flüssigkeit in ein Gas verwandelt: bei der Verdampfung. Im übrigen hat die Molekulartheorie der Flüssigkeiten nicht entfernt zu Ergebnissen von der umfassenden Leistung der kinetischen Gastheorie geführt; es ist bisher bei einigen interessanten Ansätzen geblieben; wenigstens, soweit es sich um die Flüssigkeit als Ganzes handelt, während von dem Ver-

halten ihrer Oberflächenschichten weiter unten noch zu sprechen sein wird.

Bei den festen Körpern endlich ist die Seßhaftigkeit der Teilchen außer Zweifel; es kann sich hier nur um mehr oder weniger regelmäßige Schwingungen handeln, die die Molekeln für sich oder umeinander ausführen, also nur um Spaziergänge, einzeln oder zu mehreren, mit schließlicher Rückkehr zum Ausgangspunkt und mit relativ kleiner Exkursion. Die Natur dieser Schwingungen kann sehr verschiedenartig sein, es können Pendelschwingungen oder drehende Schwingungen oder Pulsationen sein, bei denen sich die Molekel periodisch aufbläht und zusammenzieht. Jede dieser Vorstellungen wird zu anderen Konsequenzen für die Kräfte zwischen den Teilchen führen; nimmt man hinzu, daß man sich über die physikalische Natur der Schwingungen, ob sie elastischen oder hydrodynamischen oder elektrischen Charakters seien, ebenfalls sehr verschiedene Vorstellungen bilden kann, so sieht man ein, daß es sich hier wiederum um eine unübersehbare Zahl von Möglichkeiten handelt. Es muß daher genügen, als ein Beispiel die Theorie von Galitzin anzuführen, die die Molekeln als elektromagnetische Resonatoren ansieht und die diesen Resonatoren eigenen ungedämpften Schwingungen mit bestimmter Kapazität und Selbstinduktion als maßgebenden Konstanten ausführen läßt; im allgemeinen sind es freie Schwingungen, infolge der Wechselwirkung werden es aber erzwungene Schwingungen. Es zeigt sich nun in der Tat, daß die Hypothese imstande ist, die verschiedenen Eigenschaften der Molekeln näher zu verfolgen und die Erscheinungen, die die aus ihnen zusammengesetzten Körper darbieten, zu beschreiben, insbesondere auch die Strahlungserscheinungen. Das wichtigste aber ist, daß derartige Resonatoren wirklich die Eigenschaft haben, sich je nach der Entfernung abzustoßen oder anzuziehen; und zwar tritt für sehr kleine Entfernungen die Abstoßung rein hervor, während für sehr große Entfernungen das Gesetz der Anziehung in das Newtonsche Gesetz übergeht.

6. Elastizität der festen Körper. Gehen wir nun zu einer etwas spezielleren Betrachtung der einzelnen Körperklassen über. Die fundamentale Eigenschaft der dem festen Aggregatzustande angehörigen Körper ist ihre Elastizität. Die Erscheinungen, die sie darbietet, lassen sich ihrer großen Mehrzahl nach sehr befriedigend durch die Kontinuitätstheorie beschreiben, und zwar sowohl die statischen Erscheinungen, also Dehnung, Biegung, Scheerung und Drillung, als auch die kinetischen Erscheinungen, wie die elastischen Schwingungen und der elastische Stoß; nur dieser macht etwas größere Schwierigkeiten, die noch nicht vollständig überwunden sind. Immerhin hat sich schon frühzeitig der Wunsch geltend gemacht, das Erscheinungsgebiet molekulartheoretisch zu fundieren, und es sind hier zunächst die Versuche dreier französischer Physiker zu nennen, die von Navier, Poisson und Cauchy. Ihre Voraussetzungen hinsichtlich der zwischen den Teilchen wirksamen Kräfte gehen zwar in einigen Hauptpunkten auseinander, das Schlußergebnis ist aber allen im wesentlichen gemeinsam; und zwar steht es mit der Erfahrung insofern im Widerspruch, als es das elastische Verhalten der Körper auf eine einzige Konstante zurückführt, während es doch deren zwei, den Widerstand gegen Volumenänderung und den Widerstand gegen Gestaltsänderung gibt, die bis zu einem gewissen Grade voneinander unabhängig und nicht, wie jene Theorien es fordern, durch eine allgemein gültige Relation verknüpft sind. Um in dieser Richtung ein besseres Ergebnis zu erzielen, muß man eine der Grundannahmen jener Theorien, daß nämlich die Teilchen nach allen Richtungen gleich stark wirken, fallen lassen und, auch für isotrope Körper, eine „Polarität" der Molekeln, einführen; das hat schon Poisson versucht, aber erst Voigt streng durchgeführt. Leider stellt sich dabei heraus, daß man auf diese Weise auch nur zu einer einzigen Konstanten gelangt, daß also das Bild auch noch zu eng ist für die darzustellenden Tatsachen. Und da bleibt nun nichts mehr übrig, als zu sagen: eigentlich isotrope Körper gibt es gar nicht, es gibt nur „quasi-isotrope" Körper, d. h. solche, bei denen äußerst viele Teilchen immer einen sehr kleinen Kristall, sehr viele derartig kleine, verschieden orientierte Kristalle aber erst einen für unsere Organe erkennbaren Teil des Körpers bilden, so daß er für uns den Eindruck eines isotropen Körpers macht; und dann liefert die Theorie in der Tat zwei unabhängige Konstanten. Natürlich kehrt sich das Verhältnis zwischen Kristallen und isotropen Körpern jetzt insofern um, als jene die einfacheren, diese die komplizierteren Gebilde sind; und so hat denn Voigt insbesondere eine Molekulartheorie der Kristallelastizität entwickelt, die sich als mit den Beobachtungen in außergewöhnlich schönem Einklange erwiesen hat.

Die Voigtsche Theorie ist übrigens nicht die einzige, die die Elastizitätserscheinungen auf Wirkungen zwischen den Molekeln zurückführt; es sind mindestens noch zwei hier zu erwähnen, die von Lord Kelvin, die sich an die berühmte Raumgittertheorie

von Bravais anschließt; und, als Vertreterin der kinetischen Theorien, die von Slotte, in der die Molekeln also als schwingend angesehen werden und die Erscheinungen aus den Wirkungen dieser Schwingungen abgeleitet werden. Das Entfernungsgesetz der Molekularkräfte selbst spielt bei allen diesen Theorien keine sehr entscheidende Rolle; es scheint aber, daß man durch die Annahme der reziproken vierten Potenz zu den einfachsten Schlüssen gelangt.

7. **Festigkeit. Spaltung. Adhäsion.** Außer ihrer Elastizität bieten die festen Körper noch eine Reihe von Erscheinungen dar, bei denen es sich nicht um vorübergehende, sondern um dauernde Veränderungen handelt; sei es, daß dabei der Zusammenhang der Teile gewahrt bleibt, wie bei den Plastizitätserscheinungen; sei es, daß er aufgehoben wird, wie bei den Erscheinungen des Bruchs, Zerreißens, der Spaltung usw. Nun ist es klar, daß gerade in solchen Fällen die molekulare Beschreibung sehr nahe liegt; andererseits aber häufen sich hier die Schwierigkeiten in einem Maße, das bisher die Gewinnung exakter, irgendwie allgemeingültiger Ergebnisse verhindert hat, mit Ausnahme einiger spezieller Phänomene, wo die Verhältnisse sich leichter übersehen lassen. Dahin gehört beispielsweise die Eigenschaft der Kristalle, sich in gewissen Richtungen sehr leicht, in unmittelbar benachbarten, aber schon fast gar nicht mehr spalten zu lassen. Es liegt nahe, dies auf Raumgitter, also Punktanordnungen, zurückzuführen, die in den Spaltungsebenen am dichtesten, in den von ihnen abweichenden aber sehr viel spärlicher mit Punkten besetzt sind; die weitere Ausführung dieses Gedankens führt wirklich zu Schlüssen, die auch sonst im Einklange stehen mit den Ergebnissen der experimentellen Kristallographie.

Auch über die Erscheinungen bei der Berührung verschiedener fester Körper ist wenig zu sagen; in statischer Hinsicht handelt es sich hier um die sogenannte Adhäsion, in dynamischer um die äußere Reibung. Die Adhäsion zweier fester Körper aneinander ist, wie sich gezeigt hat, keine einfache Erscheinung, sondern aus verschiedenen Faktoren zusammengesetzt, von denen bald der eine, bald der andere in den Vordergrund tritt. In vielen Fällen ist entscheidend der äußere Luftdruck, der die Körper zusammenhält, so daß man reine Experimente im luftleeren Raume anstellen muß. Aber auch hier sind die Verhältnisse immer noch so verwickelt, daß es nicht möglich gewesen ist, allgemeine Gesetze abzuleiten und etwaigen Aufschluß zu gewinnen über die Wirkung aufeinander, die man den Molekeln in den Oberflächenschichten der beiden Körper zuschreiben muß. Es ist das schon aus dem Grunde sehr schwierig, weil es kaum gelingt, die Oberflächen fester Körper rein zu bekommen und dauernd zu erhalten, und weil schon die Bildung außerordentlich dünner Ueberzüge aus fremder Substanz genügt, um die Verhältnisse völlig umzugestalten. Aehnlich steht es mit der Reibung, sei es nun wälzende oder rollende, worüber man in einem besonderen Artikel näheres findet (vgl. den Artikel „Reibung“).

8. **Hydrostatik und Kapillarität.** Was zweitens die Flüssigkeiten betrifft, so hat hier ebenfalls die Stetigkeitstheorie Ausgezeichnetes geleistet; vielleicht ist hier sogar der Rahmen dessen, was sie umspannt, noch größer als bei den festen Körpern; das gilt sowohl hinsichtlich des Gleichgewichts der Flüssigkeiten wie hinsichtlich ihrer Bewegungen, also für die Hydrostatik wie für die Hydrodynamik. Das Bedürfnis nach einer Molekulartheorie hat sich daher auch zunächst nur da geltend gemacht, wo die Natur der Flüssigkeiten mit der der Gase in Berührung kommt, also namentlich bei der Verdampfung; hier setzen die Theorien von Van der Waals und Kamerlingh-Onnes ein, und auch die Theorie von Jäger sowie die von Dieterici hat entsprechende Quellen. Eine allgemeine kinetische Theorie der Flüssigkeiten hat Voigt ausgearbeitet; freilich beschränkt sie sich auf ideale Flüssigkeiten, d. h. auf solche, deren Molekeln sich bei unmittelbarer Berührung wie außerordentlich wenig deformierbare Körperchen stoßen und außerdem eine Fernwirkung aufeinander ausüben, die mit wachsender Entfernung zwar abnimmt, aber doch so langsam, daß für ihre Gesamtwirkung auf eine Molekel nicht die wenigen unmittelbar benachbarten Molekeln, sondern die in einem größeren Umkreis liegenden in Betracht kommen. Es lassen sich hieraus zahlreiche Erscheinungen, die die Flüssigkeiten darbieten, in recht befriedigender Weise darstellen.

Viel größer ist die Rolle der Molekulartheorie begreiflicherweise bei einer besonderen Klasse von Flüssigkeiten, bei den Lösungen. Hier wird die Anwendung einer kinetischen Theorie, in vollkommener Analogie mit der Gastheorie, geradezu herausgefordert, zumal bei den verdünnten Lösungen, in denen die Salzteilchen (oder überhaupt die Teilchen des gelösten Stoffes) ebenso zerstreut liegen wie die Gasteilchen im leeren Raum, nur daß hier an die Stelle dieses letzteren das Lösungsmittel tritt. Ueber die Natur der hier anzunehmenden Molekularkräfte wird man daher auch ganz

ähnliche Annahmen zu machen haben wie dort; es muß aber an diesem Hinweis genügen und auf den besonderen, diesen Gegenstand behandelnden Artikel verwiesen werden (vgl. den Artikel „Lösungen").

Auch Flüssigkeiten haben ihre Oberfläche oder ihre mit Nachbarkörpern gemeinsamen Grenzen. Den wichtigeren Fall bilden hier indessen nicht die aneinandergrenzenden Flüssigkeiten, obgleich auch die dabei auftretende Erscheinung, die Diffusion, schon kinetisch behandelt ist, sondern der Fall, daß eine Flüssigkeit und ein fester Körper aneinander grenzen; vollständiger gesagt, daß eine Flüssigkeit zum einen Teil an einen festen Körper, zum anderen Teil, den man ihre freie Oberfläche nennt, an ein Gas, z. B. die atmosphärische Luft, angrenzt. Die Gesamtheit der hierbei auftretenden Erscheinungen faßt man unter dem Namen der Kapillarerscheinungen zusammen, und die Kraft oder Eigenschaft, die ihnen zugrunde liegt, nennt man Kapillarität. Da es sich hier um ein Kapitel handelt, in dem die Hypothesen über Molekularwirkungen ein besonders günstiges Feld finden, soll diesen Erscheinungen eine etwas ausführlichere Betrachtung gewidmet werden (vgl. weiter unten unter 11. Kapillaritätserscheinungen).

9. Pulverförmige Massen. Als Ergänzung zu den festen Körpern einerseits und den Flüssigkeiten andererseits sind hier noch die pulverförmigen Massen zu erwähnen; sie bestehen zwar aus Elementen, die dem festen Aggregatzustande angehören und durch dessen Kohäsionsgesetze bestimmt werden; aber ihre Vergesellschaftung gehorcht Gesetzen, die weder mit denen der festen noch mit denen der Flüssigkeiten größere Aehnlichkeit besitzen. Insbesondere bringt hier die Beziehung der Kohäsions- und Adhäsionskräfte zur Schwerkraft besondere Figuren hervor, die Gleichgewichtsfiguren pulverförmiger Massen, wie sie sich in der Natur in den Firnfeldern, Dünen und Schutthalden zeigen und experimentell in mannigfachster Weise erzeugt und studiert werden können.

10. Erscheinungen in Gasen. Was schließlich die Gase betrifft, so ist die Zahl der Grunderscheinungen, um deren molekulares Verständnis es sich hier handelt, besonders groß; es seien nur die Erscheinungen des Drucks und der Temperatur, die Gesetze von Avogadro, Dalton, Henry, Gaylussac usw., die Differenz und das Verhältnis der spezifischen Wärmen, die Reibung und Wärmeleitung, die Verdampfung und Diffusion genannt. Dabei besteht ein Gegensatz zwischen zwei Klassen von Erscheinungen insofern, als für die eine die Geschwindigkeit der Molekeln, für die andere, die zuletzt genannten Phänomene, die Weglänge der Molekeln maßgebend ist; und für diese Weglänge kommt entscheidend in Betracht der Bereich, auf den hin sich die Molekularkräfte geltend machen. Legt man also die beobachteten Konstanten jener Erscheinungen, namentlich die Reibungskonstante und den Koeffizienten der Wärmeleitung zugrunde, so kann man den Radius der Wirkungssphäre der Molekularkräfte zahlenmäßig angeben; damit ist zugleich das einzige ermittelt, was man über die Größe der Molekeln sagen kann, da diese selbst sich natürlich aus den Erscheinungen nicht direkt ableiten läßt. Nur indem man die ganz willkürliche Annahme macht, der Radius der Molekel sei halb so groß wie der Radius der Wirkungssphäre, kommt man auch zu Zahlen für den ersteren. Was das Ergebnis angeht, so muß es genügen, hier folgendes anzuführen: der Radius der Wirkungssphäre ergibt sich für verschiedene Gase zwar verschieden, aber nicht gar so sehr, und kaum mehr verschieden als er sich für ein und dasselbe Gas für verschiedene Ableitungsmethoden ergibt; drückt man die Länge in Millionstel Millimeter aus, so kann man sagen, daß der Radius der Wirkungssphäre zwischen einem Viertel und zwei ganzen Millionstel Millimeter schwankt.

11. Kapillaritätserscheinungen. Die wichtigsten hierher gehörigen Erscheinungen sind folgende:

1. In einem engen Rohre, einem sog. Kapillarrohre (capilla = Haarröhrchen) hat eine Flüssigkeit einen anderen Stand wie in einem weiten Gefäße, in das jene Röhre eintaucht, oder in einem weiten Rohre, das mit jenem kommuniziert; bei benetzenden Flüssigkeiten findet ein Anstieg, bei nicht benetzenden eine Depression statt (Fig. 1); die Niveaudifferenz ist mit dem Durchmesser der Röhre, falls ihr Querschnitt kreisförmig ist, umgekehrt proportional, bei elliptischem Querschnitt proportional mit der Summe der beiden reziproken Achsen, zwischen zwei

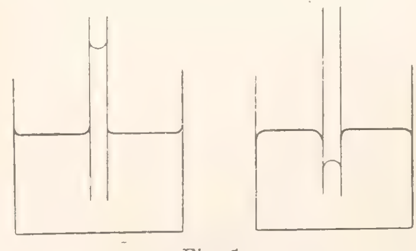


Fig. 1.

parallelen Ebenen mit deren Abstande umgekehrt proportional, aber nur halb so groß wie bei der Röhre mit gleich großem Durchmesser; zwischen zwei Platten mit keilförmigem Zwischenraum endlich bildet die Flüssigkeitsgrenze eine gleichseitige Hyperbel (Fig. 2).

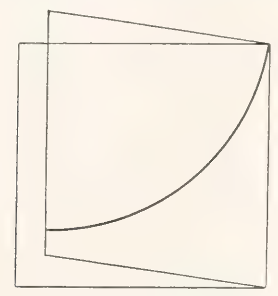


Fig. 2.

2. In einem Kapillarrohre bildet eine Flüssigkeit keine horizontale Oberfläche, sondern, je nach der Natur der Flüssigkeit und des festen Materials, eine konkave oder eine konvexe Oberfläche; jene bei positiver, diese bei negativer Steighöhe (Fig. 1). Die Fläche ist, wenn der Rohrquerschnitt kreisförmig ist, eine Rotationsfläche, aber von komplizierter, durch eine transzendente Gleichung betimmter Gestalt; praktisch wird man sie häufig, besonders in sehr engen Röhren, näherungsweise für ein Stück einer Kugelfläche ansehen dürfen; und zwar für eine Halbkugel, falls die Flüssigkeit die Wand benetzt. In diesem Falle ist der Randwinkel, d. h. der Winkel zwischen der Tangente an die Flüssigkeitsoberfläche und der Leitlinie des benetzten Wandstückes, gleich null; in anderen Fällen hat er bestimmte Werte, und zwar ist er bei konkaver Oberfläche kleiner, bei konvexer größer als ein rechter. Infolge der geschilderten Oberflächenkrümmung, des „Meniskus“, erleidet die Formel für die Steighöhe eine Modifikation und wird:

$$h = \frac{2\,\alpha}{\varrho\, g\, r} \cos\varphi - \frac{r}{3},$$

wo r der Rohrradius, g die Schwerkraft (981 cm/sec), ϱ die Dichte der Flüssigkeit, φ der Randwinkel und α eine für die Flüssigkeit charakteristische Konstante, die Kapillarkonstante, ist. In einem weiten Gefäße ist der größte Teil der Oberfläche eine horizontale Ebene, nur der äußerste Ringstreifen weicht davon ab, indem er sich nach bestimmtem Krümmungsgesetz entweder erhebt oder abfällt (Fig. 1).

3. Ein auf einer Ebene ruhender Flüssigkeitstropfen nimmt eine bestimmte Gestalt an, und zwar für sehr kleine Materialmenge die Kugelform, als ob die Schwerkraft gar nicht wirkte, für größere immer breitere Formen (Fig. 3), d. h. die Höhe des Tropfens wächst langsamer als seine Querdimension, und schließlich wächst sie gar nicht mehr: Maximalhöhe des liegenden Tropfens; sie ist bestimmt durch die Formel:

$$H = \sqrt{\frac{2\,\alpha\,(1 + \cos\varphi)}{\varrho\, g}}.$$

Genau so wie ein Flüssigkeitstropfen in Luft über einer Ebene, verhält sich eine Gasblase in Flüssigkeit unter einer Ebene.

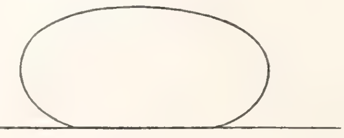


Fig. 3.

4. Dünne Flüssigkeitshäutchen (Seifenblasen) nehmen bei gegebener Flüssigkeitsmenge und gegebenen Druckverhältnissen bestimmte Gestalten an, z. B. bei vollkommen freier Oberfläche die Gestalt von Kugeln, die mit wachsendem inneren Ueberdruck immer größer und damit immer dünnwandiger werden; jenseits eines gewissen Maximaldrucks zerreißt die Blase. Lehnt sich die Lamelle an gegebene Gerüste von festen Linien an, so erhält man die verschiedenartigsten Formen (Katenoide, Nodoide, Unduloide usw.).

5. Zum Abreißen eines festen Körpers, z. B. einer Scheibe, von einer Flüssigkeitsoberfläche bedarf es einer bestimmten, mit der Wage meßbaren Kraft, die von der Scheibengröße, von der Natur der beiden Stoffe usw. abhängt.

6. Eine der Schwerkraft entzogene Flüssigkeit, z. B. eine Oelmasse in einer alkoholischen Flüssigkeit von genau gleicher Dichte, nimmt Kugelgestalt an, solange sie ruht; läßt man sie dagegen rotieren, so erhält man mit wachsender Geschwindigkeit immer stärker abgeplattete Rotationsellipsoide, und es können sich unter Umständen auch Stücke losreißen, die dann entweder wieder Kugelgestalt oder, vorübergehend, Ringgestalt annehmen: Plateausche Figuren.

7. An der unteren Oeffnung eines Flüssigkeit enthaltenden Rohres oder Gefäßes hängt ein Tropfen, dessen Größe und Gestalt von dem Drucke sowie von der Natur der Stoffe abhängt; mit wachsendem Drucke wird der Tropfen immer länger, er bildet dann in der Mitte eine Einschnürung

und schließlich löst sich ein Teil der Flüssigkeit los, bildet einen zunächst annähernd kugeligen Tropfen und fällt herunter, während die Restmasse wieder die Anfangsform annimmt, worauf sich eventuell das gleiche Spiel wiederholt.

8. Flüssigkeitstropfen oder Gasblasen in einer zylindrischen Röhre sind überall im Gleichgewicht; in einer konischen Röhre dagegen treten Bewegungen nach einer

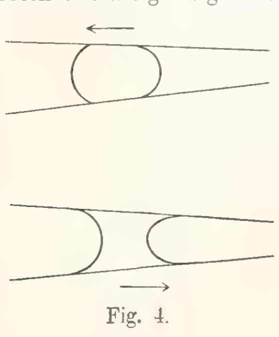


Fig. 4.

bestimmten Richtung und mit bestimmter Intensität ein, die von der Natur der beiden Stoffe abhängt.

9. Auf einer Flüssigkeitsoberfläche bilden sich unter Umständen Wellen von geringer Wellenlänge, die nicht vom Charakter von Schwerewellen, sondern Kapillarwellen sind und besondere Gesetze haben (Kräuselwellen); sie können auch mit den großen Schwerewellen zusammenwirken und dann sehr verwickelte Erscheinungen hervorbringen.

10. Eine relativ geringe Flüssigkeitsmenge breitet sich auf der Oberfläche einer anderen sehr stark aus, falls die beiden Flüssigkeiten geeignet gewählt werden. Dabei erteilt die ausgebreitete Flüssigkeit der Oberfläche fast vollständig ihre eigenen Eigenschaften. Ein Beispiel bietet die Beruhigung der Meereswellen durch eine Oelschicht.

12. Die Theorien von Laplace, Gauß, Van der Waals und Bakker. Das Grundgesetz und die Gestalt der Oberfläche. Um diese und zahlreiche weitere Phänomene zu begreifen, muß man sie vom Standpunkte einer einheitlichen Theorie betrachten. Solcher Theorien sind mehrere aufgestellt worden, die sich teils durch die Ausgangspunkte, teils durch besondere Hypothesen unterscheiden, im wesentlichen aber zu gleichen, nur mehr oder weniger weitgehenden Resultaten führen. Da alle diese Theorien sich nur in mathematischem Gewande vorführen lassen, muß es hier genügen, die wesentlichen Punkte anzudeuten.

Die erste brauchbare Theorie lieferte, nachdem Young mit den Grundideen vorangegangen war, Laplace. Er ging von der Hypothese aus, daß zwischen irgend zwei Teilchen einer und derselben oder auch zweier verschiedener Substanzen außer der Gravitation noch eine andere Anziehungskraft wirke, die aber mit wachsender Entfernung weit schneller als jene abnehme und deshalb schon in unmeßbar kleiner Entfernung unmerklich werde. Diese Kohäsionskraft muß nun ganz verschiedene Formen annehmen im Innern der Flüssigkeit einerseits und in oder nahe ihrer Oberfläche andererseits. Den Wert des inneren Drucks, den man gewöhnlich mit K bezeichnet, kann man nur unter gewissen hypothetischen Voraussetzungen berechnen und findet dann enorme Werte, die zwischen 1000 und 30 000 Atmosphären schwanken, z. B. für Wasser 10 000—18 000, für Kohlensäure 3000 Atmosphären; übrigens macht sich dieser Druck bei den Kapillarerscheinungen nicht in besonderer Weise geltend, weil hier die Erscheinungen ihrem ganzen Wesen nach durch den zweiten Teil der Kraft bestimmt werden. Dieser Teil der Kraft nun ist ersichtlich abhängig von der Gestalt der Oberfläche, und zwar im wesentlichen von ihrer Krümmung, derart, daß er entgegengesetzten Sinn erhält, je nachdem die Oberfläche konvex oder konkav ist; nur wenn die Oberfläche eben ist, fällt er fort, und dann tritt natürlich der erste Teil der Kraft in deutliche Wirkung. Von welcher Natur der zweite Teil der Kraft ist. das tritt erst recht deutlich hervor durch die Theorie von Gauß. Dieser ging von dem Begriffe der potentiellen Energie der Flüssigkeit aus, ihrer nur in Spannung, nicht in Bewegung zum Ausdruck kommenden Energie. Diese potentielle Energie nun muß ein Minimum sein, wenn ein System im Gleichgewicht sein soll; nimmt man hierzu noch die für eine Flüssigkeit erfüllte Bedingung, daß das Volumen unveränderlich sei, so findet man, daß die potentielle Energie der Kohäsionskräfte direkt proportional mit der Oberflächengröße der Flüssigkeit ist. Hieraus folgt aber, daß die Oberfläche ebenfalls ein Minimum sein muß, wenn Gleichgewicht bestehen soll; und daraus ergibt sich weiter die Anschauung, daß sich die Oberfläche in einem gespannten Zustande, ähnlich dem einer elastisch-festen, gespannten Membran, befinden muß. Dieser Tangentialdruck, im Gegensatz zu dem Druck auf das Innere, wird durch das zweite Glied der Kohäsionskraft dargestellt; er wird wie jener durch eine Konstante, außerdem aber durch die Krümmung der Oberfläche dargestellt, und zwar in der Weise, daß man durch einen bestimmten Punkt der Oberfläche in allen möglichen Richtungen innerhalb derselben Kurven legt, die beiden heraussucht, deren

Krümmung am stärksten oder am schwächsten ist (sie stehen stets aufeinander senkrecht), und nun die Summe ihrer beiden reziproken Krümmungsradien bildet. So erhält man schließlich für den Gesamtdruck die Formel:

$$P = K + \alpha\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right).$$

In dieser Formel heißt α die Kapillarkonstante (eigentlich die zweite Kapillarkonstante, aber die erste, K, ist meist nicht von Interesse), oder auch die Oberflächenspannung; zuweilen führt man auch statt ihrer durch Verdoppelung und Division mit der Dichte der Flüssigkeit eine neue Konstante ein und nennt diese dann die spezifische Kohäsion der Flüssigkeit.

Das wichtigste Ergebnis der Theorie betrifft die Gestalt kapillarer Oberflächen. Sind nämlich alle anderen Einflüsse konstant oder irrelevant, so kommt es nur auf die mittlere Krümmung, die Summe der beiden reziproken Hauptkrümmungsradien an; diese muß in allen Punkten der Fläche den gleichen Wert haben, wenn Gleichgewicht herrschen, die Fläche also von Bestand sein soll. In der Tat erklärt sich aus diesem Satze die ungeheure Mannigfaltigkeit der wirklich beobachteten Formen. Im einfachsten Falle wird diese Form eine Kugelfläche sein, weil hier beide Hauptkrümmungen gleich sind und diese Krümmung überall dieselbe ist. In allen anderen Fällen muß die eine Hauptkrümmung in demselben Maße zunehmen wie die andere abnimmt, wohlverstanden mit Rücksicht auf das Vorzeichen der Krümmung (konvexe als positiv, konkave als negativ gerechnet). An zwei Beispielen möge das etwas eingehender betrachtet werden. Man denke sich zwei Drahtkreise von gleicher Größe so in Flüssigkeit (Seifenlösung) eingetaucht, daß nach dem Herausheben sowohl jede der beiden Kreislinien als auch die sie verbindende Zylinderfläche mit einer Lamelle erfüllt ist; es entsteht dann ein geschlossener Raum, in dem ein anderer Druck wie außen herrscht, wenn der Versuch richtig ausgeführt wird. Nun ist in einem Punkte der Zylinderfläche die eine Hauptkrümmung (die vertikale) null, die andere ist die des Kreisschnittes des Zylinders, also überall dieselbe; folglich muß auch die Krümmung jeder der beiden Kappen überall gleich, d. h. sie müssen Stücke von Kugelflächen sein, und zwar, da sich hier die beiden Hauptkrümmungen addieren, Kugelflächen von dem doppelten Radius (der halben Krümmung) der Zylinderfläche (Fig. 5 a). Ganz anders, wenn man jetzt die beiden Kappen durchsticht, so daß innen und außen derselbe Druck herrscht; jetzt muß die mittlere Krümmung der die beiden Ringe verbindenden Lamelle überall gleich null sein, d. h. sie muß, da sie im Horizontalschnitt jedenfalls auch jetzt noch nach außen konvex ist, im Vertikalschnitt nach außen konkav werden; und weiter, da infolgedessen die Horizontalkrümmung in der Mitte (stärkste Einschnürung) am größten ist und von hier nach oben und unten abnimmt, muß die Vertikalkrümmung von der Mitte nach oben

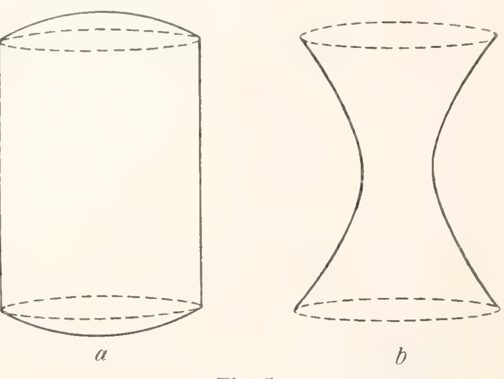


Fig. 5.

und unten ebenfalls abnehmen, damit die Differenz — denn diese ist hier wegen des entgegengesetzten Vorzeichens der beiden Krümmungen anstatt der Summe zu nehmen — immer null bleibt. Man erhält auf diese Weise eine Fläche, die man, weil ihre Leitlinie ein Stück einer Kettenlinie ist, als Katenoid bezeichnet (Fig. 5 b). Alle diese Forderungen der Theorie werden durch den Versuch bestätigt.

Das andere Beispiel soll den schon erwähnten Fall eines hängenden und abreißenden Tropfens betreffen. Hier wirken die potentielle Energie der Kohäsionskräfte und die der Schwerkraft zusammen, die in allen Punkten eines Horizontalschnitts gleich groß sind, aber von oben nach unten sich ändern. Von den beiden Teilen der Kohäsionskraft nimmt der eine, der von der Krümmung im Horizontalschnitt herrührt, von oben nach unten dauernd zu, da diese Schnitte Kreise von immer kleinerem Radius sind; oben, wo die potentielle Energie der Schwere null ist, muß also die andere Krümmung, nämlich die in der Vertikalebene, wie man sie in der Zeichnung direkt sieht, negativ, d. h. die Kurve muß hier nach außen konkav sein; dann kommt eine Stelle mit einem Inflexionspunkt, hier ist die Kurve ein unendlich kurzes Stück lang gerade, und von nun an ist sie ebenfalls nach außen konvex. Wird der Druck von oben größer, so nimmt der Tropfen eine Form an, bei der die Tangente im Inflexionspunkt vertikal ist; bei

weiterer Steigerung des Drucks erhält der Tropfen sogar eine Einschnürung, d. h. die Horizontalkrümmung wird nach unten größer hin von da ab wieder ~~kleiner~~, schließlich wird die Spannung in der Einschnürung so groß, daß Zerreißung eintritt. So weit geht die Darstellung der tatsächlichen Erscheinungen durch die Theorie, daß sich auch ein von vornherein gar nicht zu vermutendes Detail ergibt, nämlich die Erscheinung, daß

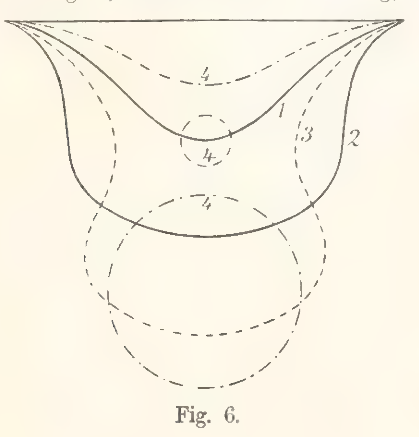


Fig. 6.

sich nicht ein einziger Tropfen abschnürt, sondern, zwischen dem großen abfallenden und dem hängenbleibenden Tropfen noch ein aus der Einschnürungspartie gebildetes Tröpfchen.

In ähnlicher Weise lassen sich alle oben erwähnten Erscheinungen bis in die Einzelheiten verstehen: der Meniskus kapillarer Flüssigkeitssäulen, die Höhe und Gestalt hängender Tropfen, die Größe und Dicke von Seifenblasen als Funktion des im Innern hergestellten Druckes und ebenso die Bewegungsvorgänge.

Immerhin bleibt die Tatsache der Oberflächenspannung etwas sehr Merkwürdiges, und man hat daher versucht, die Vorstellung in die Theorie einzuführen, daß die Konstitution der Oberflächenschicht einer Flüssigkeit eine andere ist wie die ihres Innern — eine Vorstellung, die übrigens auch durch verschiedene Beobachtungen nahegelegt wird. Die erste derartige Theorie rührt von Gibbs her, sie ist aber nicht allgemein durchgeführt und, trotz mancher Erfolge, doch nicht geeignet, das Problem im ganzen zu lösen. Deshalb ist Van der Waals einen Schritt weiter gegangen durch die Annahme, daß sich die Oberflächenschicht der Flüssigkeit von innen nach außen derart verändert, und daß dasselbe bei dem Nachbarmedium, z. B. der Luft, stattfindet, daß überhaupt keine Diskontinuität mehr vorhanden ist, das eine Medium vielmehr ganz allmählich in das andere übergeht. Diese Theorie ist dann von Bakker ausgeführt und modifiziert worden und führt zu einer Reihe sehr bemerkenswerter Fortschritte in dem Verständnis der Kapillarerscheinungen.

14. Oberflächenspannung, Randwinkel, Grenzschicht und Wirkungsbereich der Molekularkräfte. Aus der Beobachtung der Erscheinungen und der Messung der bei ihnen auftretenden Größen, also der Steighöhe, des Randwinkels, der Höhe von Tropfen, der Dicke von Blasen usw., kann man schließlich die Werte der theoretischen Größen ableiten. In erster Reihe steht hier die Kapillarkonstante oder Oberflächenspannung α, sodann die Dicke der heterogenen Grenzschicht, schließlich der Radius der Wirkungssphäre der Molekularkräfte.

Was zunächst die Kapillarkonstante betrifft, so folgen hier ihre Werte für einige Flüssigkeiten; es sei aber bemerkt, daß die Genauigkeit, zu der die physikalische Methodik auf diesem Gebiete gelangt, recht beschränkt ist, und daß es nur durch äußerste Sorgfalt in der Reindarstellung der Flüssigkeiten und der festen Wände gelingt, einigermaßen zuverlässige Werte zu gewinnen. Die Zahlen beziehen sich auf das absolute Maßsystem.

Quecksilber gegen Luft	450
„ „ Wasser . . .	420
„ „ Alkohol . .	400
Wasser gegen Luft	76
Alkohol gegen Luft	23
Wasser gegen Olivenöl	21
Aether gegen Luft	17
Alkohol gegen Olivenöl	$2\frac{1}{2}$

Hieraus ergibt sich für die Steighöhe des Wassers in einer Röhre vom Radius r:

r =	0,5	0,2	0,1	0,05	0,02	0,01 cm
h =	0,13	0,68	1,47	3,08	7,75	15,5 cm

andererseits die Depression des Quecksilbers in denselben Röhren

d = — 0,31 0,51 0,97 2,40 4,81 cm;

obgleich also die Kapillarkonstante des Quecksilbers sehr viel größer ist als die des Wassers, ist doch die Depression viel kleiner, weil die Dichte so sehr viel größer ist.

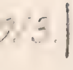
Uebrigens nimmt die Oberflächenspannung mit steigender Temperatur ab, wenn auch nicht sehr kräftig. Für wässerige Lösungen ist sie größer als für Wasser und zwar um einen der gelösten Menge äquivalenten Betrag, für viele Lösungen um 2% pro Aequivalent auf 100 Aequivalente Wasser.

Die zweite wichtige Größe ist der Randwinkel. Seine Bestimmung ist deshalb so schwierig, weil er außerordentlich empfindlich gegen Verunreinigungen der Flüssigkeit und der festen Oberfläche ist; um ihn exakt zu bestimmen, muß man daher den

Versuch sofort nach der Reinigung ausführen. So findet man ihn z. B. in dem wichtigsten Falle, Wasser gegen Glas, desto kleiner, je schneller man mißt, so daß man annehmen darf, daß sein wahrer Wert geradezu null ist: Glas wird von Wasser benetzt. Auch an frische Metallflächen scheint Wasser sich anzuschmiegen, jedoch ist es hier nicht ganz so sicher, daß man wirklich null erhält. Olivenöl hat einen Randwinkel, der je nach der Art des festen Körpers zwischen 23 und 36° schwankt; in demselben Bereiche liegt er für die meisten Flüssigkeiten, wie Alkohol, Chloroform, Schwefelkohlenstoff. Dagegen ist er, wie gesagt, für Quecksilber größer als ein rechter, und zwar recht erheblich: gegen Glas liegt er zwischen 127 und 135°; dieser Wert, der die Depression des Quecksilbers gemäß der oben angeführten Formel beeinträchtigt, ist bei der Berechnung dieser Depression oben schon berücksichtigt.

Während die beiden bisher betrachteten Konstanten eine Vergleichung der Theorie mit der Beobachtung erlauben, sind die beiden folgenden rein hypothetischer Natur, haben aber dieselbe Zuverlässigkeit wie die Hypothesen, auf denen eben die Theorie aufgebaut ist. Dazu gehört insbesondere die Annahme, die über das Abnahmegesetz der Molekularkräfte mit der Temperatur gemacht wird; je nachdem man hier eine Potenz, und zwar eine höhere, oder eine Exponentialfunktion einsetzt, wird das Ergebnis verschieden ausfallen; indessen handelt es sich ja hier ohnehin um keine exakte Ermittelung, sondern um die Größenordnung und allenfalls den rohen Wert der betreffenden Größen. Die eine von ihnen, die Dicke der abweichend konstituierten Grenzschicht, ergibt sich als abhängig von der Temperatur, und zwar mit ihr steigend; beispielsweise findet Bakker nach seiner Theorie für Aether, daß sie für —40° etwa gleich 3,6, für +100° aber schon gleich 8,5 milliontel Millimeter ist; und ähnliche Werte dürften auch für Wasser gelten.

Bleibt noch die letzte und in gewisser Hinsicht interessanteste Größe übrig, die Reichweite der Molekularkräfte. Diese Größe kommt in den obigen Formeln in sehr einfacher Weise zum Ausdruck, nämlich, wenigstens der Größenordnung nach, durch das Verhältnis der beiden Konstanten a zu K; von diesen ist eben a außerordentlich klein im Vergleich zu K. Auf diese und manche andere Weise kommt man zu dem Schlusse, daß der Radius der Molekularsphäre zwischen einem sechstel und einem ganzen milliontel Millimeter liegt, in leidlicher Uebereinstimmung mit dem Bereiche, zu dem die kinetische Gastheorie führt. Auch sieht man, daß die kapillare Grenzschicht eine Dicke hat, die mehreren, bis zu etwa 20 Reichweiten der Molekularkräfte entspricht, ein Verhältnis, das im allgemeinen als sehr verständlich erscheint.



So kann man im ganzen sagen, daß das Bild, das wir uns mit Hilfe der Kapillarerscheinungen und der Vorgänge an festen und gasigen Körpern von den Molekeln und den zwischen ihnen wirksamen Kräften machen können, zwar in vieler Hinsicht noch zu wünschen übrig läßt, aber doch in den wesentlichen Zügen schon recht befriedigend ist.

Literatur: **D. Bernoulli** *Hydrodynamica Straßburg 1738 (10. Abschnitt)* — **K. Lasswitz** *Geschichte der Atomistik Hamburg 1890* — **Wittwer** *Grundzüge der Molekularphysik Stuttgart 1885* — **Dalton** *A new system of chemical philosophy London 1808* — **Th. Young** *A course of lectures on natural philosophy London 1807* — **G. Hansemann** *Die Atome und ihre Bewegungen Köln 1871* — **B. Galitzin** *Ueber die Molekularkräfte und die Elastizität der Moleküle Bull. Acad. St. Petersburg 1895* — **Todhunter and Pearson** *A history of the theory of elasticity etc. London 1886ff.* — **Frankenheim** *Die Lehre von der Kohäsion Breslau 1835* — **G. Th. Fechner** *Ueber die physikalische und philosophische Atomenlehre Leipzig 1855* — **G. Mie** *Moleküle, Atome, Weltäther Leipztg 1904* — **Krönig** *Grundzüge einer Theorie dev Gase Berlin 1856* — **R. Clausius** *Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie Braunschweig 1867* — **O. E. Meyer** *Die kinetische Theorie der Gase Breslau 1877* — **J. D. van der Waals** *Die Kontinuität des gasförmigen und flüssigen Zustandes Leipzig 1881* — **L. Boltzmann** *Vorlesungen über Gastheorie Leipzig 1896/98* — **B. Weinstein** *Thermodynamik und Kinetik der Körper Braunschweig 1901ff.* — **J. H. Jeans** *The dynamical theory of gases Cambridge 1904* — **Th. Young** *Essay on the cohesion of fluids Phil. Trans. London 1805* — **P. S. Laplace** *Théorie de l'action capillaire, in: Mécanique céleste Paris 1806* — **C. F. Gauss** *Principia generalia theoriae figurae fluidorum Werke Bd. V und Ostwalds Klassiker Nr. 135* — **J. D. van der Waals** *Thermodynamische Theorie der Kapillarität Zs. f. phys. Chemie 13 657 1894* — **G. Bakker** *ib. 33 477 1900; u. 48 1 1904; 51 344 1905.* — **Plateau** *Statique des liquides soumises aux seules forces moléculaires Gand 1873.*

F. Auerbach.

Molekularlehre.

1. Mol und Molekel. 2. Volumgesetz der Gase. 3. Gas- und Dampfdichte: a) Verfahren von Regnault-Dumas. b) Verfahren nach Gay-Lussac-Hofmann. c) Verfahren von V. Meyer. d) Bunsens Methode. e) Ergebnisse. Maßgrößen. f) Prinzip von Avogadro. 4. Molargewicht von gelösten Stoffen: a) Begriff der Lösung. b) Ideal verdünnte Lösungen. c) Dampfdruckdepression; d) Siedepunktserhöhung; e) Gefrierpunktserniedrigung; f) Ergebnisse der Molargewichtsbestimmung an Lösungen. 5. Molargewicht von flüssigen Stoffen. Molare Oberflächenenergie. 6. Molargewicht fester Stoffe. Isomorphie. 7. Feste Lösungen. 8. Allgemeine Regeln für die Molargewichtsbestimmung beliebiger reiner Stoffe: a) Molarvolum. Flüssige Stoffe. Feste Stoffe. b) Molarwärme. c) Verdampfungswärme. Regel von Pictet-Schiff-Trouton. d) Refraktion; e) Andere Regeln. 9. Vergleich der Ergebnisse verschiedener Methoden. 10. Auffassung vom Standpunkte der Molekularhypothese.

1. Mol und Molekel. Unter dem Worte Molekularlehre versteht man strenggenommen die Lehre von der Molekel (sprachlich inkorrekt Molekül oder Molekul). Indessen hat man sich gewöhnt, es auch auf die Lehre von der chemischen Maßeinheit (dem Mol, wie man nach Ostwalds Vorschlage sagt) und deren Bestimmung, sowie auf die Lehre von den Zustandseigenschaften der Stoffe auszudehnen. Dies hat seinen Grund darin, daß nach Einführung der Korpuskularhypothese — der Vorstellung, daß jeder Stoff aus untereinander gleichen sehr kleinen diskreten Masseteilchen zusammengesetzt sei — die am Stoffe beobachteten Eigenschaften als Eigenschaften eines jeden dieser Teilchen, der „Molekeln", oder als durch gegenseitige Beeinflussung (Anziehung und Bewegung) dieser Teilchen untereinander verursachte Erscheinungen aufgefaßt wurden. Es wäre jedenfalls rationell, diese Zusammenfassung durch das Wort Molekularlehre zu unterlassen, und dieses lediglich der Lehre von der Molekel vorzubehalten, zumal da sehr häufig die Anschauung auftritt, daß der Molekularbegriff einer Denknotwendigkeit entspreche, während er nichts weiter ist als ein heuristisch wie mnemonisch nützliches Hilfsmittel, dessen man zur Darstellung der Tatsachen nicht notwendig bedarf.

Der Begriff des Mols hat sich aus dem des Verbindungsgewichtes auf Grund der Erfahrungstatsache entwickelt, daß Umwandlungen bei Einwirkung verschiedener Stoffe aufeinander nach bestimmten Gewichtsverhältnissen erfolgen. Wenn Chlorwasserstoff und Ammoniak unter Bildung von Chlorammonium miteinander reagieren, so sind zur Entstehung von je 100 g Chlorammonium 31,82 g Ammoniak und 68,18 g Salzsäure nötig; und hat man von einer dieser Komponenten mehr als diese relative Menge genommen, so bleibt der Ueberschuß unverbunden. 100 g Kohlendioxyd kann man erhalten durch Verbrennung von 27,273 g Kohlenstoff mit 72,727 g Sauerstoff oder von 63,637 g Kohlenoxyd mit 36,363 g Sauerstoff; um aber diese 63,637 g Kohlenoxyd zu erhalten, braucht man 27,273 Kohlenstoff und 36,363 g Sauerstoff. Es besteht also zwischen Kohlenstoff, Sauerstoff, Kohlenoxyd und Kohlendioxyd das Verhältnis 27,273:36,363:63,637:100,000 oder 12,00:16,00:28,00:44,00. Diese Verhältniszahlen bleiben bestehen, wenn Kohlenstoff und Sauerstoff in andere Verbindungen eingehen, z. B. Harnstoff (zu dessen Bildung außerdem Stickstoff und Wasserstoff nötig sind). Man nennt sie die Verbindungsgewichte (näheres siehe im Artikel „Atomlehre") und wählt als Bezugsnorm das Verbindungsgewicht des Sauerstoffs, das gleich 16,000 gesetzt wird. Die auf diese Norm bezogene Menge eines jeden einheitlichen reinen Stoffes (vgl. den Artikel „Atomlehre") nennt man ein Mol, und die in Grammen ausgedrückte Gewichtsmenge, mit der ein jeder in irgendeine Reaktion gemäß diesen Verhältniszahlen bei vollständiger Umsetzung (vgl. den Artikel „Chemisches Gleichgewicht") eingeht, wird das Molargewicht genannt. Dabei ist zu beachten, daß die Norm, Sauerstoff = 16,000, zwar aus bestimmten Gründen, aber doch willkürlich gewählt ist, alle Zahlen also nur relative Bedeutung haben.

Die Bestimmung dieser Zahlenverhältnisse ist eine der Fundamentalaufgaben der Chemie, und je nach der Beschaffenheit der Stoffe schlägt man verschiedene Wege ein. Außer dem rein analytischen Verfahren (Wägung von Ausgangsstoffen und Umwandlungsprodukten, vgl. den Artikel „Atomlehre") ist besonders eine Methode von Wichtigkeit, die zunächst nur auf Gase anwendbar ist, deren Resultate aber meist entscheidende Bedeutung haben.

2. Volumgesetz der Gase. Der Zustand einer jeden gegebenen Gasmasse ist in thermischer und mechanischer Hinsicht, also bezüglich Raumerfüllung und Wärmezustand, völlig bestimmt, wenn Druck, Volum und Temperatur bekannt sind. Es besteht, wenn p den Druck, v das Volum, T die Temperatur, m die Masse bezeichnet, die Gleichung

$$p . v = K . T . m$$

wo K eine für das gegebene Gas konstante Größe ist. Diese Gleichung gilt umso strenger, je näher sich das Gas dem sogenannten idealen Zustande befindet; das ist im allgemeinen der Fall, je kleiner p und je größer

T ist (vgl. auch die Artikel „Aggregatzustände" und „Gase").

Bezeichnet v das Volum der Masseneinheit, so wird

$$p.v = K.T$$

oder

$$v = K.\frac{T}{p}$$

Vergleicht man nun verschiedene Gase bei gleichem p und T, so erhält man für die Volumina der Masseneinheit

$$\frac{v_1}{K_1} = \frac{v_2}{K_2} \ldots\ldots = \text{const.}$$

Nun hat Gay-Lussac (vgl. den Artikel „Gase") gefunden, daß diese Volumina gleicher Gewichtsmengen bei Gleichheit von Temperatur und Druck sich umgekehrt verhalten wie die Molargewichte (die damals auf Grund analytischer Untersuchungen festgestellt waren). Ist also das Molargewicht von Kohlenoxyd 28,00, das von Kohlendioxyd 44,00 (s. oben), so verhält sich, wenn beide ideale Gase sind, unter den angegebenen Bedingungen v_1 (Kohlenoxyd) zu v_2 (Kohlendioxyd) wie 44,00:28,00. Das bedeutet, daß $28{,}00.K_1 = 44{,}00.K_2 = R$. Diese universelle Größe R nennt man die auf ein Mol bezogene Gaskonstante (auch Avogadrosche Konstante). Man kann also, wenn M das Molargewicht eines Gases bedeutet, allgemein sagen

$$p.(M.v) = R.T; \tag{1}$$

nennt man M.v das Molarvolum, so heißt dieser Satz: „Bei Gleichheit von Temperatur und Druck sind für beliebige ideale Gase die Molarvolume gleich." Der reziproke Wert von v oder von (M.v) heißt Gasdichte; diese gibt also die Masse in Gramm oder in Mol an, die unter gegebenen Bedingungen v erfüllt.

3. Gas- und Dampfdichte. Es ist sofort klar, daß, wenn man diesen in der letzten Formel ausgedrückten Satz, da er vielfach bestätigt ist, als Leitsatz verwendet, sich Molargewichte von Gasen bestimmen lassen. Denn man braucht nur das von der Gewichtseinheit unter bekanntem Drucke p und bekannter Temperatur T erfüllte Volumen v zu messen, da die Universalkonstante R aus Messungen an nachgewiesenermaßen dem Gesetze folgenden Gasen bekannt ist. Man braucht nicht einmal unter einem für alle zu untersuchenden Gase gleichen Drucke (von der Temperatur gilt das gleiche) zu arbeiten, da ja das Gesetz allgemein beliebige Werte von p und T umfaßt. Nur ist es nötig, festzustellen, daß das in Untersuchung gezogene Gas dem Gesetze auch hinreichend genau folgt. Ob dies der Fall ist, erlaubt das Gesetz dadurch zu prüfen, daß man für eine gegebene Masse den Druck oder die Temperatur willkürlich variiert. Bleibt der aus den so gefundenen Werten von Druck, Volum und Temperatur berechnete Wert von M immer derselbe, so ist damit die Anwendbarkeit des Gesetzes bewiesen und der gefundene Wert von M ist als das Molargewicht des Stoffes in gasförmigem Zustande anzusprechen. Wenn aber, was oft der Fall ist, diese Konstanz nicht besteht, so erlaubt die Reihe der gefundenen Werte von M oft eine Ermittelung des wahren Molargewichtes durch graphische oder algebraische Extrapolation, da man die Gesetze dieser Extrapolation allgemein aufstellen kann (vgl. den Artikel „Graphische Darstellung").

Uebrigens genügt oft auch eine rohe, durch unvollkommene Gültigkeit des Gesetzes (infolge von Veränderlichkeit des Objektes mit Druck und Temperatur) entstellte Bestimmung, da die Methode vielfach nur zur Entscheidung zwischen zwei weit auseinander liegenden Werten von M benutzt wird. Solche Werte ergeben sich, wenn man durch die Analyse festgestellt hat, daß nur die Wahl zwischen mehreren sich wie 1:2, 1:3, 2:3 usw. verhaltenden Zahlen zu treffen ist. Die experimentelle Durchführung dieser Gedanken erlaubt nun offenbar prinzipiell verschiedene Anlagen. Festzustellen sind Masse, Druck, Temperatur und Volum; man kann also bei bekanntem Volum und gegebener Temperatur den Druck messen, den die gewogene Substanzmenge ausübt, oder Druck und Temperatur festlegen und das eingenommene Volum bestimmen, ferner Temperatur und Druck festlegen und im gegebenen Volum die nötige Masse abmessen und nachher wägen, oder auch die Temperatur bestimmen, die eine gegebene Masse bei bestimmtem Drucke haben muß, um ein bestimmtes Volum auszufüllen. Während das letzte Prinzip praktisch nicht ausgearbeitet ist, begründen sich auf die drei anderen eine große Zahl spezieller Versuchsverfahren; die wichtigsten davon sind die folgenden.

3a) Verfahren von Regnault-Dumas. Ein je nach Umständen gewählter aus passendem Material (Glas, Porzellan) bestehender Ballon, dessen Größe nach der Substanz verschieden gewählt ist ($^1/_4$ bis 10 l), wird zur Ermittelung seines Volumens (durch einen Hahn abgegrenzt) leer ausgepumpt und mit Wasser oder Quecksilber gefüllt gewogen. Dann schließt man ihn an ein Rohr an, das ihn mit dem Gase zu füllen erlaubt, bringt ihn in einem Bade auf bekannte Temperatur, füllt ihn mit dem Gase und liest dabei an einem mit ihm verbundenen Manometer den Druck ab. Sobald diese Ablesungen gemacht sind, wird der Hahn geschlossen, der Ballon abgenommen und gewogen. Diese letzte Wägung

liefert das Gewicht des Stoffes, so daß nun alle Daten bekannt sind.

Bei Gasen muß man eine relativ große Zahl von Korrekturen anbringen, die um so mehr ins Gewicht fallen, je geringer das Molargewicht des Stoffes ist. Denn nicht nur ist das als Differenz zweier Wägungsresultate ermittelte Stoffgewicht dem Einflusse der Wägungsfehler dann um so mehr unterworfen, sondern man muß auch große Ballons verwenden. Dabei muß deren Luftauftrieb sehr genau bestimmt werden, wobei noch für genaue Messungen in Betracht kommt, daß das Volum des ausgepumpten Ballons wegen des Atmosphärendruckes kleiner ist als das des gasgefüllten, mithin die Luftauftriebe verschieden sind.

Beispielsweise sei erwähnt, daß die Vernachlässigung dieses letztgenannten Umstandes bei Regnaults berühmten Untersuchungen die für Wasserstoff gefundenen Werte um rund 1 % fehlerhaft gemacht hatte, bevor man die Korrektur anbrachte.

Für leicht verdampfbare Stoffe hat Dumas die Anordnung so gewählt, daß er einen gewogenen Ballon (von etwa ½ l) in ein enges Röhrchen auslaufen ließ, ihn mit einem Ueberschusse der (flüssigen) Substanz beschickte, in einem Bade (Wasser, Anilin usw.) erhitzte, bis er nur noch Dampf enthielt, zuschmolz, wog, nachher unter Wasser öffnete und mit Wasser vollgesaugt wieder wog. Der Druck wurde dabei gleich dem am Barometer abgelesenen Atmosphärendrucke angenommen. In dieser Form ist das Verfahren noch häufig in Gebrauch, hat aber den Nachteil, daß man nur bei Atmosphärendruck arbeiten kann. Will man die oben bezeichnete Prüfung auf die Konstanz des Molargewichtes machen, so variiert man die Temperatur innerhalb nicht zu enger Grenzen.

3b) Verfahren nach Gay-Lussac-Hofmann. Ein vertikal aufgestelltes, oben geschlossenes Glasrohr von etwa 2 cm Weite, das mit einer Teilung versehen ist, ist umgeben von einem konaxialen weiten Rohr, durch das mit Hilfe von Ansatzröhren der Dampf eines bei der gewünschten Temperatur siedenden Stoffes strömt, so daß auch das Innenrohr diese Temperatur annimmt. Dieses wird vor dem Versuche mit Quecksilber gefüllt und dann unter Quecksilber umgekehrt, so daß in seinem oberen Teile, falls es über 76 cm lang ist, ein Vakuum entsteht. Man wägt das Untersuchungsobjekt in einem kleinen Röhrchen ab und läßt dieses in dem inneren Rohr aufsteigen. Dann fällt die Quecksilbersäule infolge der Dampfbildung. Man liest an der Teilung das Volum des Dampfes ab und mißt die Höhe der Quecksilbersäule über dem äußeren Niveau. Zieht man diese vom Barometerstande ab, so erhält man den Druck, unter dem der Dampf steht; damit sind wieder alle nötigen Daten bekannt. Das Verfahren eignet sich gut für leicht verdampfbare Stoffe, aber, wenn man ein Zuleitungsrohr anbringt, auch für Bestimmungen an Gasen, jedoch nur für relative, da man bei diesen die Wägung nicht machen kann. Durch eine kleine Modifikation (Anbringung einiger Nebenröhren) läßt es sich für Messung unter verschiedenen Drucken einrichten. Vor dem Dumasschen Verfahren hat es den Vorzug, daß bei der Wägung der Substanzmasse nicht wie dort das Verdampfungsgefäß mitgewogen werden muß, so daß die Luftauftriebskorrektur praktisch erspart wird.

3c) Verfahren von V. Meyer. Statt das Quecksilber als Sperrflüssigkeit zu verwenden und zu verdrängen, kann man auch andere Substanzen wählen; bei passender Anordnung sogar Gase. Man muß dann dafür sorgen, daß sich das Sperrgas und das Untersuchungsobjekt möglichst wenig miteinander mischen, teils weil sonst die verdampfte Substanz an kalten Apparatteilen kondensiert werden könnte, teils weil bei solchen Stoffen, die nicht streng dem Gasgesetze folgen, das Resultat von dem Volum abhängt, das der Dampf einnimmt. Nach der von V. Meyer gegebenen Anordnung verfährt man folgendermaßen.

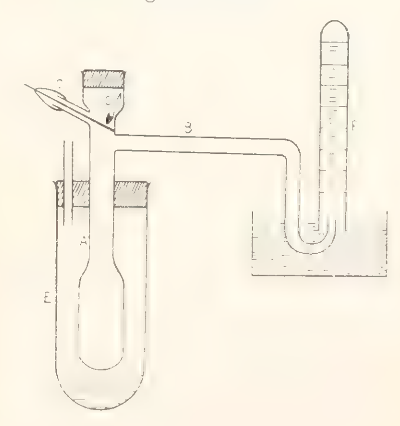


Fig. 1.

Ein Kolben A mit langem Ansatzrohr (die „Birne") wird in einem Dampfbade E auf konstante, hinreichend hohe Temperatur erhitzt. Im Halse befindet sich eine bewegliche Stütze C (verschiebbarer Stab), auf der ein Röhrchen oder Eimerchen D mit der abgewogenen Substanz ruht. Ein Seitenrohr B führt zu einem Gasmeßrohr F. Beim Erhitzen tritt Luft aus der Birne in das Meßrohr; ist die Temperatur konstant geworden, so bleibt das Niveau in diesem konstant. Man läßt

nun die Substanz in den heißen Teil fallen, sie verdampft sofort und verdrängt ein weiteres Luftvolum. Dessen Größe wird an der Meßrohrteilung abgelesen. Man kennt also Volum und Stoffmenge, ferner die Temperatur des Meßrohrs (Zimmertemperatur) und den Druck (Barometerstand, eventuell unter Berücksichtigung des Gewichtes der sperrenden Flüssigkeitssäule). Es ist demnach nicht nötig, die Temperatur in der Birne genau zu kennen, diese muß nur während des Versuches konstant sein. Denn der verdrängende Dampf würde, wenn er Dampf bliebe, im Meßrohr den gleichen Raum einnehmen, wie die von ihm dorthin gedrängte Luft, vorausgesetzt, daß diese ein ideales Gas ist. Ob dies bei dem Dampfe selbst der Fall ist, erfährt man hier wie bei Dumas' Verfahren durch Variation des Heizbades.

Das Verfahren ist namentlich auf sehr schwer verdampfbare Stoffe angewendet worden; neuerdings hat Nernst vermöge Anwendung des bis oberhalb 2000° brauchbaren Iridiummetalls als Material für die Birne sogar Metalldämpfe untersuchen können.

3d) Bunsens Methode. Außer den drei beschriebenen, besonders häufig benutzten Methoden existieren noch eine sehr große Zahl von anderen. Sie laufen aber fast alle auf prinzipiell unwesentliche Modifikationen hinaus, und von den übrig bleibenden wird mit Ausnahme einer einzigen praktisch kein Gebrauch gemacht. Diese eine beruht auf einer neuen theoretischen Grundlage. Wenn man einen gashaltigen Raum mit einem sehr kleinen Loch an einer sehr dünnen Stelle der Wand versieht, und dann das Gas durch einen kleinen konstanten Ueberdruck hinaustreibt, so erfolgt die Ausströmung so, daß die Zeiten, in welchen gleiche Volumina zweier Gase ausgeströmt sind, sich verhalten wie die Quadratwurzeln aus den Gasdichten. Die Begründung dieses Satzes ist eine Aufgabe der Hydrodynamik (siehe die Artikel „Gasbewegungen" und „Flüssigkeitsbewegungen"), dagegen hat sie nichts mit der Molekulartheorie zu tun, wie manchmal geglaubt wird.

Demnach kann man, besonders bei Gasen, die Arbeiten bei Zimmertemperatur erlauben, wie folgt arbeiten (Bunsen). In einen Glaszylinder A, der mit Quecksilber gefüllt ist, wird ein unten offenes, oben durch einen weiten Hahn verschlossenes Rohr B gesteckt, das unterhalb des Hahns durch ein dünnes mit einem feinen Loche versehenes Metallplättchen C quer abgedeckt ist. Im Rohre sitzt ein Schwimmer D, der zwei Marken trägt. Man füllt das Rohr bis zu einem gewissen kleinen Ueberdruck mit Gas, fixiert es und schließt den Hahn. Wenn man ihn dann wieder öffnet, so steigt der Schwimmer auf und man beobachtet die Zeit zwischen dem Vorbeigange der Marke des Schwimmers an zwei am Rohr angebrachten Marken. Dieser Verschiebung entspricht Ausfluß eines immer gleichen Gasvolums. Der Druck bleibt dabei nicht ganz konstant, doch kann man die Abnahme sehr klein machen, wenn man den Zylinder oben sehr weit gegen das Rohr wählt und überdies ist der Einfluß dieser Aenderung klein, da jedes gemessene Gas in gleicher Weise betroffen wird und man ohnehin nur relative Messungen machen kann. Da man also stets gleiche Volumina ausströmen läßt, so verhalten sich die Quadrate der beobachteten nötigen Zeiten gerade wie die Dichten, d. h. wie die Molargewichte.

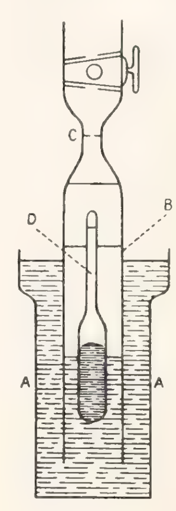


Fig. 2.

3e) Ergebnisse. Maßgrößen. Die Genauigkeit der Molargewichtsbestimmungen, wie sie nach den vorbeschriebenen Methoden ausgeführt werden, ist sehr verschieden. Von einer Unsicherheit von weit weniger als 0,1%, die man mit der Wägung von praktisch idealen Gasen, wie Sauerstoff, in Ballons bei Beachtung aller Fehlerquellen erzielen kann, schwankt sie bis zu mehreren Prozenten bei gewöhnlicher Ausführung. Dies liegt zum Teil an Unvollkommenheit des idealen Zustandes der untersuchten Stoffe, und in dieser Hinsicht ist praktisch wichtig die Vorschrift, daß man Dämpfe nicht in gesättigtem Zustande (vgl. die Artikel „Aggregatzustände" und „Gase") untersuchen soll, sondern bei Unterdruck, weil nahezu gesättigte Dämpfe niemals ideale Gase sind. Man muß also bei Atmosphärendruck über den Siedepunkt erhitzen (um ca. 20°) oder beim Siedepunkt unter weniger als Atmosphärendruck beobachten. Andererseits werden Fehler durch experimentelle Schwierigkeiten verursacht, besonders wenn man bei sehr hohen Temperaturen arbeiten muß. Aus schon angegebenem Grunde genügt aber sehr oft eine um einige Prozent unsichere Zahl.

Als Beispiele seien hier einige Zahlen angeführt, die auf verschiedenen Methoden beruhen. Jedoch müssen vorher die Maßeinheiten besprochen werden.

Daß die Temperatur in Celsiusgraden und die Masse oder das Gewicht in Grammen gemessen werden, bedarf keiner besonderen

Erörterung. Nur ist zu beachten, daß in dem oben erwähnten Gasgrenzgesetze die Größe T nicht die vom Eispunkt an, sondern die vom „absoluten Nullpunkt“ (gleich —273°) an gerechnete „absolute Temperatur“ (vgl. den Artikel „Thermometrie“) bedeutet. Wenn wir nun den Druck p in Atmosphären rechnen (vgl. den Artikel „Druck“), das Volum in Litern, so erhält die Konstante R den Wert 0,08207. Wird das Volum in Kubikzentimetern gerechnet, so ist R 1000mal so groß. Zählt man den Druck in mm Quecksilber von 0°, so ist R statt 0,08207 gleich 0,08207.760, da 760 mm Hg gleich einer Atmosphäre gelten. In den zuerst genannten Maßen ausgedrückt ist das von einem Mol eines idealen Gases bei 0° (also T = 273) unter dem Druck von einer Atmosphäre erfüllte Volum gleich (0,08207 .273):1 = 22,412 l. Dieses Volumen enthält 32,000 g Sauerstoff, oder 28,01 g Stickstoff, oder 2,0150 g Wasserstoff (abgesehen von den kleinen Abweichungen vom idealen Zustande), und dies sind die aus der Gasdichte abgeleiteten Molargewichte (vgl. weiter unten). Für atmosphärische Luft ergibt sich die Gasdichte (das Molargewicht) hiernach zu 28,95. Wenn in der Literatur Gasdichten auf Luft als Einheit bezogen angegeben sind, so erhält man aus diesen Zahlen die Molargewichte durch Multiplikation mit 28,95.

In der folgenden Tabelle sind die auf Luft gleich 1 bezogenen Dichten, die auf Luft = 28,95 oder Sauerstoff gleich 32,000 bezogenen, den Molargewichten gleichen Dichten, die anderweit abgeleiteten theoretischen Molargewichte und die Beobachtungsdaten angeführt.

Stoff	Luft = 1	Sauerstoff = 32,000 Luft = 28,95	Normales Molargewicht	Temperatur (T—273)	Druck in Atmosphären
Wasserstoff	0,069601	2,0155	2,0150	0°	1
Sauerstoff	1,1053	32,03	32,000	0°	1
Ammoniak	0,5971	17,287	17,03	0°	1
Stickstoff	0,96727	28,05	28,02	0°	1
Chlorwasserstoff	1,2692	36,74	36,46	0°	1
Kohlenoxyd	0,96709	26,738	26,01	0°	1
Stickoxydul	1,5301	44,298	44,02	0°	1
Kohlendioxyd	1,5289	44,263	44,01	0°	1
Schwefeldioxyd	2,2639	65,45	64,06	0°	1
Wasser	0,624	18,0	18,01	197,3	1
Benzol	2,712	78,5	78,04	100	1
Aether	2,593	75,0	74,08	78,7	1
Alkohol	1,610	46,60	46,04	98,3	1
Essigsäure	1,85	53,5	60,03	220	11,4
Essigsäure	3,88	112,4	60,03	320	56
Essigsäure	2,63	76,2	60,03	100	1
Tetrachlorkohlenstoff	5,68	164,5	153,8	100	1,9
Zinnchlorid	9,25	270,5	259,8	100	0,65
Wismut	11,98	342,5	208,5	1626	1
Antimon	10,74	311	120,2	1572	1
Arsen	5,45	158	75,0	1714	1
Quecksilber	7,01	202,5	200,0	1731	1
Kupferchlorür	6,44	186,2	99,0	1691	1
Chlorsilber	5,70	164,8	142,4	1735	1
Phosphor (P = 31,0)	4,35	176,0	P_4 = 124,0	500	1
Phosphor	3,63	105,0	P_4 = 124,0	1484	1
Phosphor	3,14	91,0	P_4 = 124,0	1708	1
Jod	8,7	250	J_2 = 254	600	1
Jod	4,5	130	J = 127	1400	1
Schwefel	4,85	140		448	0,18
Schwefel	7,20	208	S_2 = 64,12	448	0,63
Schwefel	7,63	221		448	0,14
Schwefel	8,13	235	S_8 = 254,5	448	0,42
Schwefel	7,89	228	S = 32,06	448	0,71
Schwefel	—	50	S = 32,06	2023	1
Schwefeltrioxyd	2,80	81,1	80,06	99,2	1
Chlornatrium	—	53—63	58,5	1970	1

Die groben Abweichungen zwischen zweiter und dritter Zahlenkolonne, die wir besonders bei den Metalldämpfen, sowie Kupferchlorür, Essigsäure, Jod, Phosphor, Schwefel finden, sind durch die Annahme zu erklären, daß die Stoffe in ihrem Zustande, also ihrem Molargewichte, veränderlich sind. Bei Phosphor findet man je nach der Temperatur Werte bis zum vierfachen Atomgewichte, bei Essigsäure und Schwefel ist die Druckabhängigkeit gut sichtbar. Diese Verhältnisse lassen sich durch die Vorstellung der Komplexbildung in Abhängigkeit von äußeren Umständen auf Grund des Massenwirkungsgesetzes darstellen (vgl. den Artikel „Chemisches Gleichgewicht“). Eine dieser Vorstellung gleichwertige Auffassung liefert die Lehre von der Molekularattraktion (vgl. die Artikel „Kinetische Theorie der Materie“ und „Molekularkräfte“).

3f) Das Prinzip von Avogadro. Einer Erläuterung bedarf noch der Umstand, daß die oben für verschiedene bekannte Stoffe, wie die elementaren Gase, angegebenen Molargewichte nicht mit den Atomgewichten (vgl. den Artikel „Atomlehre“) übereinstimmen, sondern genau ganzzahlige Vielfache — hier das Doppelte von diesen — betragen. Dies hat folgenden Grund. Wenn aus 35,45 g Chlor und 1,008 g Wasserstoff 36,46 g Chlorwasserstoff entstehen, wie es die Analyse ergibt, so sollte man, falls die Stoffe alle drei in Form idealer Gase von gleichem Drucke und gleicher Temperatur vorliegen, zunächst erwarten, daß aus einem Volumen (= 35,45 g) Chlor und einem Volumen (= 1,008 g) Wasserstoff ein Volumen Chlorwasserstoff entstände, wenn die Atomgewichte gleich den Molargewichten wären. Dies ist nun nicht der Fall, sondern man erhält zwei Volumina Chlorwasserstoff. Dieser Widerspruch löst sich, wenn man annimmt, daß die Molargewichte von Chlor und von Wasserstoff doppelt so groß sind wie die Atomgewichte, also einem Mol je zwei Verbindungsgewichte entsprechen, und die Reaktion nicht in einer Kondensation $Cl + H = HCl$, sondern in einem Austausche $Cl_2 + H_2 = 2HCl$ besteht. In der Sprache der Molekularhypothese (s. S. 1019) heißt dies, daß in einer Chlormolekel ein Atom Chlor durch ein Atom Wasserstoff ersetzt wird und das zweite Chloratom sich an das zweite Atom Wasserstoff anlagert, so daß zwei Molekeln Chlorwasserstoff entstehen. Es können also die Molargewichte der Gase nicht nur gleich den Atomgewichten sein, sondern auch ganzzahlige Vielfache davon. Dieser Satz, den man das erweiterte Gay-Lussacsche Volumgesetz nennen könnte, heißt nach seinem Entdecker das Prinzip (oft inkorrekterweise „Gesetz“ oder „Regel“) von Avogadro und wurde von diesem in folgender Form ausgesprochen. „Unter gleichen äußeren Bedingungen enthalten gleiche Volumina verschiedener idealer Gase gleichviel Molekeln (also nicht gleichviel Atome). Dieser Satz ist ganz allgemein für beliebige Gase als Grundlage für die Wahl des Molargewichtes angenommen worden. So schreibt man die Reaktion der Wasserbildung aus Wasserstoff und Sauerstoff nicht $2H + O = H_2O$, weil dann ein Volumen aus dreien entstehen müßte, sondern $2H_2 + O_2 = 2H_2O$, weil tatsächlich aus dreien zwei entstehen. Ferner muß man die Verbrennung von Kohlenoxyd zu Kohlendioxyd schreiben $2CO + O_2 = 2CO_2$, und nicht $CO + O = CO_2$, weil aus drei Volumina zwei entstehen, nicht aber ein Volumen aus zwei. In beiden Fällen müssen wir Sauerstoff das Molargewicht $2 . 16,000 = 32,000$ zuschreiben; und bei der Durchprüfung der gewählten Zahlen hat sich allgemein kein Widerspruch gezeigt.

Durch diese Erweiterung wird übrigens der Zahlenwert der Gaskonstanten R betroffen, deren genaue Berechnung auf Grund der an den nahezu idealen Gasen H_2, O_2, N_2 gemachten Messungen zu der oben angeführten Zahl geführt hat. Wären die Molargewichte als H, O, N angenommen, so wäre auch R nicht 0,08207, sondern $\frac{1}{2} . 0,08207$.

Da das Molargewicht definitionsgemäß eine charakteristische Stoffkonstante ist, so erhebt sich nunmehr die Frage, ob die aus dem Avogadroschen Prinzip abgeleiteten Zahlen mit den auf andere Relationen und Methoden begründeten übereinstimmen. Wir hätten also die Stoffe in ihrem festen, geschmolzenen und gelösten Zustande zu vergleichen. Obwohl es einfacher erscheint, zunächst die festen und geschmolzenen Substanzen zu betrachten, so wollen wir doch mit den gelösten beginnen, die Rechtfertigung dieses Verfahrens wird sich von selbst ergeben.

4. Molargewicht von gelösten Stoffen. a) Begriff der Lösung. Unter einer Lösung wollen wir ganz allgemein ein mechanisch nicht trennbares Gemisch von mindestens zwei reinen Stoffen (vgl. den Artikel „Atomlehre“) verstehen, insbesondere dann, wenn dieses Gemisch flüssig ist. Auch feste Lösungen (vgl. die Artikel „Lösungen“ und „Chemisches Gleichgewicht“) lassen sich auf Grund dieser Definition annehmen, dagegen ist es zweifelhaft, ob es zweckmäßig und allgemein durchführbar ist, den Begriff auch auf Gasgemische auszudehnen. In manchen Lehrbüchern geschieht dies; aber an dieser Stelle braucht nicht auf die Frage

eingegangen zu werden, da gasförmige Lösungen hier nicht in Betracht kommen. Nur soviel sei betont, daß der Begriff der Lösungserscheinung eine, wenn auch vielleicht schwache und leicht rückgängig zu machende, aber nie ganz fehlende gegenseitige Einwirkung der Komponenten involviert (vgl. den Artikel „Hydrate") und auch in früherer Zeit so aufgefaßt worden ist, und daß bei flüssigen und auch festen Stoffen eine solche Vorstellung durchaus einleuchtend ist, dagegen nicht bei Gasen, wenn sie dem idealen Grenzgesetze folgen. Denn dessen Gültigkeit auch für das Gemisch setzt völlige gegenseitige Unabhängigkeit der Komponenten voraus, und es müßte also beachtet werden, ob das Gemisch sich wie ein ideales Gas verhält oder nicht; mithin könnte man nicht jedes gasförmige Gemisch ohne nähere Prüfung als eine Lösung auffassen.

Bei flüssigen Gemischen zeigen sich nun oft sehr deutlich die Symptome gegenseitiger Einwirkung. Wenn man zwei Stoffe einfach miteinander mischt, ohne daß gegenseitige Einwirkung erfolgt, so sollte jede Eigenschaft des Gemisches sich nach der Mischungsregel aus denen der Komponenten ermitteln lassen, z. B. die Dichte, die Lichtbrechung usw., so wie bei idealen Gasen (vgl. Daltons Gesetz der Partialdrucke in dem Artikel „Gase"). Nun ist das sehr oft nicht der Fall, und man muß also annehmen, daß irgend etwas dabei erfolgt, was mit gegenseitiger Einwirkung zu tun hat. Theoretische Erklärungen dafür kann man auf verschiedene Gedanken begründen, unter anderen auch auf den, daß eine Art chemischer Umsetzung oder Verbindung erfolge, die leicht rückgängig zu machen ist. Die Gesetze, zu denen man dann kommt, sind bisher noch nicht sicher bekannt, aber in einem besonderen Falle lassen sie sich angeben, und dann kommt man sofort zu sehr wichtigen Schlüssen. Dies ist der Fall der ideal verdünnten Lösung, und mit diesem haben wir uns hier zu beschäftigen.

4b) Ideal verdünnte Lösungen. Betrachten wir der Einfachheit halber ein System aus nur zwei Komponenten (A und B), beispielsweise Alkohol und Wasser, Zucker und Wasser, Naphthalin und Benzol oder andere. Wenn von diesen beiden Bestandteilen der eine in viel größerer Menge zugegen ist als der andere, etwa im Gewichtsverhältnisse A:B = 1000:1, so wird, wenn auch eine chemische Einwirkung beider aufeinander stattfindet, diese Einwirkung nicht merklich zur Geltung kommen. Nehmen wir beispielsweise an, daß eine definierte (eventuell isolierbare) chemische Verbindung aus Zucker und Wasser (Zuckerhydrat) entstehe, die auf ein Mol Zucker (342 g) 6 Mol Wasser (6×18 = 108 g) verbraucht, und der Zucker vollständig in diese Verbindung überginge, so würde, wenn wir wie oben 1 g Zucker in 1000 g Wasser lösen, das Gemisch dann aus $1 + \frac{108}{342} = 1{,}318$ g Zuckerhydrat und $1000 - \frac{108}{342} = 996{,}8$ g Wasser bestehen. Statt $\frac{1}{342}$ Mol Zucker und 1000 g Wasser wären also $\frac{1{,}318}{342+108} = \frac{1}{342}$ Mol Zuckerhydrat und 996,8 g Wasser vorhanden. Es bleibt also die Anzahl Mol des in geringer Menge vorhandenen Bestandteils (Zucker) erhalten, indem statt dessen ebensoviel Mol der Verbindung auftreten, und vom anderen, dem Wasser, ist nur soviel in diese übergegangen, daß seine noch übrige Menge praktisch ungeändert geblieben ist. Ob also eine solche chemische Einwirkung stattfindet oder nicht, so bleibt das Verhältnis der Anzahl Mol des in kleiner Menge vorhandenen Bestandteils (des „gelösten Stoffes") zu der Menge des anderen (des „Lösungsmittels"), die natürlich gleichfalls in Mol gezählt werden könnte, meist aber in Grammen gezählt wird, praktisch unverändert.

Solche Lösungen nun, bei denen dies zutrifft, nennt man „ideal verdünnte" oder auch oft kurz „verdünnte" Lösungen. Auf sie beziehen sich die jetzt zu besprechenden Gesetze, deren Anwendung in der Praxis zur Bestimmung von Molargewichten gelöster Stoffe führt.

Die theoretische Begründung dieser Gesetze ist von van't Hoff im Jahre 1885 gegeben worden; sie bildet einen besonderen Teil der angewandten Thermodynamik (vgl. den Artikel „Lösungen"). Wir verzichten hier auf die Begründung und betonen nur, daß diese Gesetze so lange streng richtig sind, als die Annahme berechtigt ist, daß eine ideal verdünnte Lösung wirklich vorliegt; wie man dies feststellt, kann hier nicht besprochen werden. Denn außer dieser Annahme setzen sie nur die „Hauptsätze" der Thermodynamik voraus (vgl. den Artikel „Energielehre").

Die Erscheinungen, welche hier besonders in Betracht kommen, sind die Veränderung des Dampfdrucks, des Siedepunktes und des Gefrierpunktes des Lösungsmittels durch die Auflösung des gelösten Stoffes.

4c) Dampfdruckdepression. Wasser hat bei jeder Temperatur einen bestimmten Dampfdruck p_0 (vgl. die Artikel „Flüssigkeiten" und „Druck"). Wenn, wie im oben benutzten Beispiel, eine kleine Menge Zucker in viel Wasser gelöst wird, so beobachtet man, daß bei derselben Temperatur der Dampfdruck kleiner, etwa gleich p ist. Dieser Wert p hängt nun ab von der Konzentration des

Zuckers, d. h. von dessen relativer Menge im Verhältnisse zum Wasser. Solange die Lösung ideal verdünnt ist, ist nun die Differenz $p_0 - p$ proportional der Konzentration, wobei der Proportionalitätsfaktor natürlich von den Einheiten abhängt, in denen man Druck und Konzentration mißt. Dieser Satz ist empirisch von F. M. Raoult gefunden worden. Nach der van't Hoffschen Begründung kann man sagen, daß die relative Dampfdruckdepression $(p_0 - p) : p_0$ gleich dem Molenbruche ist. Unter dem Molenbruche versteht man die Anzahl Mol n des gelösten Stoffes im Gemisch, bezogen auf die Gesamtzahl Mole $n + N$ beider Stoffe, wobei N, die Anzahl Mol des Lösungsmittels, gleich deren Gewichtsmenge dividiert durch sein Molargewicht im ideal gasförmigen Zustande (also 18 für Wasser) gesetzt wird. Die Formel lautet also

(1) $$\frac{p_0 - p}{p_0} = \frac{n}{n + N}$$

Da N hiernach eine bekannte Größe ist, so braucht man in jedem Falle nur p zu messen — denn p_0 ist ja aus den ein für allemal bestimmten Dampfdrucktabellen des Lösungsmittels zu entnehmen — um n berechnen zu können. Aus n und der bekannten Gewichtsmenge g des gelösten Stoffes aber ergibt sich sofort dessen Molargewicht m als

(2) $$m = \frac{g}{n}$$

Die Bestimmung von p ist nun nach sehr vielen Methoden ausführbar, denn man kann natürlich jede statische und auch manche dynamische Methode der Dampfdruckmessung benutzen. Indessen sind natürlich bei verdünnten Lösungen nur kleine Differenzen zwischen p_0 und p vorhanden, und dadurch kommt der Einfluß der Versuchsfehler auf $p_0 - p$ und also auch auf n stark zur Geltung. Bei dem oben erwähnten Beispiele von 1 g Zucker und 1000 g Wasser liegen die Zahlenverhältnisse wie folgt: 1000 g Wasser sind gleich $\frac{1000}{18} = 55{,}5$ Mol H_2O, wenn das Molargewicht von Zucker 342 ist, bekommt n den Wert $\frac{1}{342} = 0{,}00292$. Daraus folgt

$$\frac{p_0 - p}{p_0} = \frac{n}{n + N} = \frac{0{,}00292}{0{,}00292 + 55{,}5} = 0{,}0000525$$

d. h. die relative Depression ist rund 0,005 % des Dampfdrucks p_0. Selbst bei einer 10proz. Lösung, also bei 100 g Zucker auf 1000 g Wasser, ergibt sich erst ein Effekt von 0,5%. Da nun bei 100° der Dampfdruck des Wassers 760 mm beträgt, so wäre im ersten Falle $p_0 - p = 760 . 0{,}00005 = 0{,}04$ mm Hg, und dieser Wert muß auf einige Prozent genau gemessen werden.

Man bedient sich daher am besten einer Differenzmethode, indem man entweder statisch die beiden Flüssigkeiten, Wasser und Lösung, durch ein feines Differentialmanometer (vgl. den Artikel „Manometer") getrennt, gegeneinander schaltet, auf gleiche Temperatur bringt, und am Ausschlag des Manometers direkt die Differenz $p_0 - p$ abliest, oder indem man ein Durchleitungsverfahren anwendet. Wenn nämlich ein trockener Luftstrom so durch die Lösung geleitet wird, daß er sich völlig mit deren Dampfe sättigt, so ist der Gewichtsverlust g des Gefäßes, d. h. die verdampfte Menge Wasser, ein Maß für den Dampfdruck (man läßt den Strom nicht zu lange laufen, damit nicht eine merkliche Konzentrationserhöhung eintrete). Leitet man diese Gasmasse dann durch reines Wasser (bei gleicher Temperatur und gleichem Druck), so muß sie, um sich auf dessen höheren Dampfdruck zu sättigen, aus diesem noch die Menge $g_0 - g$ aufnehmen. Die Differenz der beiden Gewichtsverluste, dividiert durch g_0, ergibt dann

$$\frac{g_0 - g}{g_0} = \frac{p_0 - p}{p_0}$$

Wesentlich ist bei dieser Methode, daß der gelöste Stoff nicht mit verdampft, weil ja sonst seine Konzentration sich ändern würde. Zwar bietet die theoretische Berücksichtigung einer merklichen Verdampfungsfähigkeit des gelösten Stoffes keine Schwierigkeit, doch wird die experimentelle Arbeit komplizierter.

Im allgemeinen vermeidet man nach Möglichkeit diese Methode, da die ihr theoretisch eng verwandte Methode der Siedepunktserhöhung (vgl. unten) weit bequemer und für gewöhnlich auch genauer arbeitet.

Nur ein Zahlenbeispiel sei hier angeführt. Es bezieht sich auf Lösung von Naphtalin in Aether bei 12,9°. Hier beträgt der Dampfdruck des Aethers 330,5 mm Hg, die Konzentration a ist in Gramm Naphtalin pro Gramm Aether ausgedrückt, die Dampfdruckerniedrigung $p_0 - p$ in mm Hg. Wenn das Molargewicht des Aetherdampfes M $= 76{,}5$ ist (der Aetherdampf ist unter diesen Umständen kein ganz ideales Gas), m das gesuchte des gelösten Naphtalins, so erhält man folgende Beziehungen aus Gleichung (1) und (2)

$$\frac{p_0 - p}{p_0} = \frac{n}{n + N} = \frac{g}{m} \cdot \frac{1}{\frac{g}{m} + \frac{G}{M}}$$

(3) $$m = \frac{p}{p_0 - p} . a . M$$

a	p_0-p	m
0,0064	1,56	103
0,0204	3,88	131
0,0674	12,86	127
0,0998	17,64	134
0,1285	22,24.	136

Das aus chemischen Gründen erwartete Molargewicht ist m = 128; damit stimmen diese Zahlen, mit Ausnahme der ersten, besonders stark durch Versuchsfehler beeinflußten, hinreichend gut überein.

4d) Siedepunktserhöhung. Die experimentelle Schwierigkeit genauer Messungen von Dampfdruckerniedrigungen hat Beckmann (1888) dazu geführt, an Stelle des einer bestimmten Temperatur entsprechenden Dampfdrucks die einem bestimmten Dampfdrucke entsprechende Temperatur zu messen. Man kommt so zur Methode der Siedepunktserhöhung. Wie bei einem reinen Stoffe jeder Temperatur ein bestimmter Dampfdruck entspricht, so ist dies auch bei Lösungen der Fall; jede Lösung siedet bei bestimmtem Drucke unter einer ganz bestimmten Temperatur. (Ueber Sieden vgl. die Artikel „Aggregatzustände“ und „Flüssigkeiten“). Das Sieden selbst bietet praktische Vorteile, denn es bewirkt nicht nur durch seine Rührwirkung den Temperaturausgleich verschiedener Teile der Flüssigkeit, so daß deren mittlere Temperatur durch ein hineingestecktes Thermometer sicher angezeigt wird, sondern es beseitigt auch eine bei der Dampfdruckmessung von Lösungen sehr gefährliche Fehlerquelle, die darin besteht, daß die Verdampfung nur von der Oberfläche der Lösung aus erfolgt, so daß diese, wenn man nicht rührt, eine starke Konzentrationsänderung erfährt und der gemessene Dampfdruck dann einer falschen Konzentration entspricht.

Ein bestimmter Druck bietet sich von selbst dar, wenn man in einem offenen Gefäße sieden läßt. Denn der Atmosphärendruck, der dann die Siedetemperatur bestimmt, pflegt in der zum Versuche nötigen Zeit nur wenig zu variieren. Natürlich muß die verdampfte Flüssigkeit wieder kondensiert werden. Der von Beckmann angegebene und von ihm und vielen Anderen im Laufe der Zeit vielfach in seinen Teilen modifizierte Apparat läßt sich wie folgt skizzieren.

Das gläserne Siedegefäß A wird bis über die Thermometerkugel mit dem reinen Lösungsmittel von bekannter Menge gefüllt; unten wird eine Schicht Granaten, Glasperlen oder Platinstücke („Tetraeder“) eingelegt, um den von hier aufsteigenden warmen Flüssigkeitsstrom und die Dampfblasen zu verteilen. Das Thermometer sitzt im Halse des Rohres. Ein seitliches Rohr C trägt einen kleinen, von innen betriebenen Einhängekühler B, und steht nach außen mit der Atmosphäre in Verbindung, ein zweites Ansatzrohr D ist mit einem Stopfen E verschlossen.

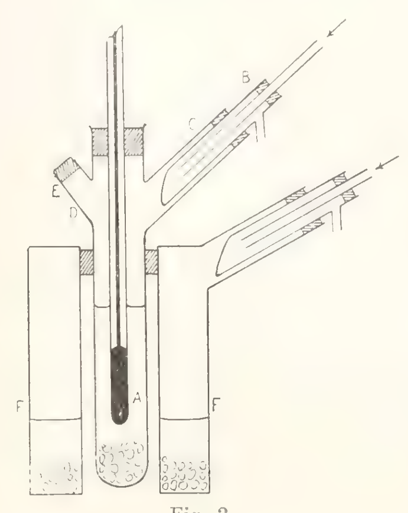


Fig. 3.

Umgeben ist das Ganze von einem doppelwandigen Gefäß, dem Dampfmantel F, in dem ebenfalls reines Lösungsmittel siedet, zum Zwecke, den schroffen Temperaturfall vom Siederohr zur Zimmertemperatur zu beseitigen, und das ebenfalls einen kleinen Kühler trägt. Bei niedrig siedenden Stoffen, wie Aether, kann der Dampfmantel durch einen einfachen „Luftmantel“ ersetzt werden. Man heizt mit einer passenden Flamme, bis das Thermometer konstant steht, liest die Temperatur ab und wirft dann durch D eine bekannte Menge des zu untersuchenden Stoffes ein. Das Thermometer steigt und stellt sich nach kurzer Zeit wieder ein. Die abgelesene Temperaturerhöhung entspricht der hergestellten Konzentration. Man kann dann noch mehrmals Substanz einwerfen und so für verschiedene Konzentrationen die Erhöhung bestimmen.

Diese Erhöhungen betragen, wenn man im Gültigkeitsgebiete der unten mitzuteilenden Formeln bleiben will, meist nur Bruchteile eines Grades. Das hierfür nötige feine, in 0,02° oder 0,01° geteilte und die Ablesung von Bruchteilen dieser Intervalle gestattende Thermometer kann nicht für alle beliebigen Lösungsmittel dienen, wenn es vom Eispunkte an graduiert ist. Um nicht viele Thermometer mit verschiedenen Nullpunkten vorrätig halten zu müssen, benutzt man ein „metastatisches“ Thermometer, das eine Verschiebung des Nullpunktes durch Aenderung der Quecksilberfüllung gestattet, wäh-

rend seine Skala, innerhalb deren man mißt, unverändert bleibt, und somit der „Gradwert“ (vgl. den Artikel „Thermometrie“) sich praktisch nicht ändert. Die hierfür gebräuchlichen Formen hat ebenfalls Beckmann angegeben.

Will man nicht bei Atmosphärendruck arbeiten, so muß eine Druckregulation benutzt werden.

Es ist noch ein anderes Verfahren gebräuchlich, das von Sakurai, Landsberger, Beckmann u. A. ausgearbeitet worden ist. Dieses beruht darauf, daß man durch die Lösung den Dampf des siedenden Lösungsmittels leitet, der sich so lange in ihr kondensiert, bis sie siedet. Die eintretende kleine Konzentrationsänderung wird durch Wägen des Lösungsgefäßes bestimmt. Dies ist eine Art Umkehrung des bei der Dampfdruckdepression erwähnten Durchleitungsverfahrens. Was nun die Theorie betrifft, so ist sie sehr einfach und schließt sich eng an die der Dampfdruckdepression an. Für kleine Aenderungen des Siedepunktes sind nämlich, wie die Thermodynamik leicht zeigen kann, die Erhöhungen des Siedepunktes bei konstantem Druck proportional den Erniedrigungen des Dampfdruckes, die man bei konstant bleibender Temperatur beobachten würde. Bei Kenntnis des Proportionalitätsfaktors würde man also sofort auf die oben durchgeführte Berechnung übergehen können. Dieser Faktor ist nun thermodynamisch auffindbar; die Theorie ist von Arrhenius und Beckmann im Anschlusse an eine von van't Hoff stammende Ableitung für die Gefrierpunktserniedrigung (vgl. S. 1029) angegeben worden. Wenn nun aber die Siedepunktserhöhung proportional der Dampfdruckerniedrigung ist, so muß sie auch proportional der Konzentration sein. Bezeichnen wir sie, in Graden gemessen, mit Δ, die Konzentration, gemessen in Mol pro 1000 g Lösungsmittel, mit C, so ist

(4) $$C . E = \Delta$$

Der Faktor E ist nach der eben angedeuteten Theorie lediglich vom Lösungsmittel abhängig und zwar

(5) $$E = \frac{RT^2}{w},$$

wo T die absolute Siedetemperatur, w die Verdampfungswärme (vgl. den Artikel „Latente Wärme“) bei T und R die „Gaskonstante“ (siehe 3e) ist. Mißt man w in großen Kalorien pro Kilogramm Lösungsmittel, so ist R = 0,001985. Als Beispiel diene Wasser. Für dieses ist T = 100 + 273, w = 537 bei 100°, daraus folgt E = 0,514°. Also wenn ein Mol eines Stoffes in 1000 g Wasser gelöst wird, so steigt, falls die angenommenen Gesetze gelten, der Siedepunkt um 0,514°. Hat man so für eine Lösung die Größe Δ und damit C gefunden, so ergibt sich das Molargewicht nach Formel (2), analog wie bei der Dampfdruckdepression, da man ja die gewichtsmäßige Zusammensetzung der Lösung kennt.

Die Konstanten E haben folgende Werte für Atmosphärendruck (also gewöhnliche Siedetemperaturen).

Lösungsmittel	T—273	E
Wasser	100	0,514
Aethylalkohol	78,8	1,15
Aethyläther	35,0	2,10
Benzol	80,3	2,70
Chloroform	61,2	3,88
Aceton	56,3	1,73
Schwefelkohlenstoff	46,2	2,37
Schwefelsäure	326	5,33
Anilin	182	3,32
Ammoniak	— 33,7	0,32
Pyridin	115	2,95
Phenol	183	3,04

Einige Beispiele mögen zeigen, wie die Ergebnisse dieser gegenwärtig täglich zahllose Male benutzten Methode sind. a bedeutet Gramm Substanz auf 1000 g Lösungsmittel,

(6) $$m = \frac{E}{\Delta} \cdot a$$

ist das gesuchte Molargewicht.

Borsäure in Wasser			Resorcin in Alkohol		
a	Δ	m	a	Δ	m
23,9	0,197	62,4	23,7	0,228	119
70,6	0,585	62,0	60,6	0,611	114
153,2	1,279	61,6	123,2	1,293	109

Aus chemischen Gründen sind die Molargewichte 62,0 oder 120,0 zu erwarten. Besonders das zweite Beispiel zeigt, daß bei hoher Konzentration die Ergebnisse ungenügend werden (vgl. unten).

Man kann auch dann die Methode benutzen, wenn man die Größe E nicht vorausberechnen kann, etwa weil w noch nicht gemessen ist. Dazu ist nur nötig, einige solche Stoffe in dem fraglichen Lösungsmittel zu untersuchen, von denen man annehmen darf, daß sie ihr bekanntes Molargewicht richtig ergeben würden. Dann ist E als Unbekannte zu betrachten und aus derselben Gleichung (6) zu berechnen. Dies ist die empirische Ermittelung von E; und man sieht leicht, daß die Benutzung der Gleichung (5) dann sogar erlaubt, das bis dahin unbekannte w zu berechnen.

Auch dann ist die Methode anwendbar, wenn das Lösungsmittel gar kein reiner Stoff, sondern eine Lösung ist, etwa 50-prozentiges Gemisch von Alkohol mit Wasser oder von Aether mit Benzol. Denn

man kann nicht nur die jedem solchen Gemische zukommende Konstante E wie eben beschrieben empirisch ermitteln, sondern sie auch nach der Mischungsregel aus den Konstanten der beiden Komponenten und dem Mischungsverhältnisse berechnen.

Wenn der gelöste Stoff merklich flüchtig ist, bedarf die Theorie wie das Experiment einer Erweiterung. Es muß dann die wahre Zusammensetzung von Lösung und Dampf bestimmt werden. Wenn man dann diese wirkliche Konzentration der Lösung, nicht die synthetisch hergestellte, die ja nicht erhalten bleibt, in die Rechnung einführt, und die Konstante E für die Temperatur berechnet, unter der das reine Lösungsmittel sieden würde, wenn der auf ihm lastende Druck nicht dem totalen Dampfdrucke beider Stoffe, sondern dem ihm in diesem Falle zukommenden Partialdrucke (vgl. den Artikel „Gase") gleichkäme, so sind alle wesentlichen Momente berücksichtigt.

4e) Gefrierpunktserniedrigung. Auf eine bis ins Kleinste formal analoge Theorie ist die Methode der Gefrierpunktserniedrigung begründet. Löst man in einem reinen Stoffe, dem ein definierter Schmelzpunkt oder Gefrierpunkt (vgl. die Artikel „Aggregatzustände" und „Chemisches Gleichgewicht") zukommt, einen anderen Stoff in geringer Menge auf, so wird im allgemeinen der Gefrierpunkt dieser Lösung, d. h. die Temperatur, bei der sie mit ihrem erstarrten Lösungsmittel (dem „Eise") im Gleichgewicht bestehen kann, ohne daß weitere Erstarrung oder Schmelzung eintritt, erniedrigt. Die Größe dieser Erniedrigung ist ebenso ein Maß für die Konzentration wie die der Erhöhung des Siedepunktes, und auch die Formeln sind dieselben, nur haben sie andere Zahlenwerte der Konstanten. Bei kleinen Depressionen besteht zwischen diesen und ihren zugehörigen Konzentrationen Proportionalität; auch dieser Satz ist empirisch von F. M. Raoult gefunden worden. Drücken wir das unter Benutzung derselben Zeichen wie früher aus, so ist

$$(4a) \qquad -C.E = \Delta$$

nur bezeichnet Δ hier eine Temperaturerniedrigung, und E hat einen anderen Wert. Er ist

$$(5a) \qquad -E = -\frac{RT^2}{w}$$

wo T die Gefriertemperatur des reinen Lösungsmittels, w die zugehörige Erstarrungswärme bedeutet. Dem negativen Werte von Δ entspricht der Umstand, daß w bei der Erstarrung das umgekehrte Vorzeichen hat wie beim Sieden, denn Erstarrung erfolgt bei Wärmeentziehung, Sieden unter Wärmezufuhr. Diese Formel ist von van't Hoff aufgestellt worden und ihr ist die für die Siedepunktserhöhung mitgeteilte nachgebildet worden. Die Zahlenwerte folgen unten.

Experimentell hat die Methode Beckmann ausgestaltet, und man arbeitet meistens nach seinen Angaben.

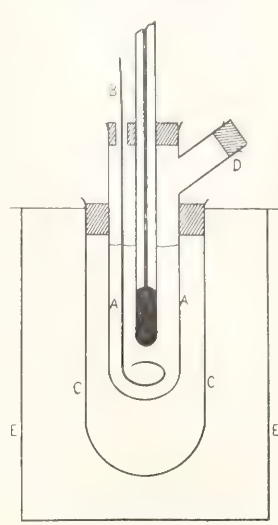


Fig. 4.

Das Gefriergefäß A wird mit dem (Beckmannschen s. o.) Thermometer und einem aus dünnem Glasrohr gebogenen Rührer B, der leicht durch den Stopfen gleitet, versehen, in den Luftmantel C eingesetzt, der dem gleichen Zwecke dient wie der Siedemantel (s. o. Fig. 3 S. 1027), und mit diesem in das mit einer passenden Kältemischung, deren Temperatur 3° unter der zu messenden liegt, gefüllte Gefäß E eingesetzt. Man beobachtet die Temperatur, bei der eine Ausscheidung von Eis erfolgt, indem man gut durchrührt. Dann wird durch D die Substanz eingeführt und nach deren Lösung der neue Gefrierpunkt in gleicher Weise bestimmt. Es ist praktisch, erst die Flüssigkeit etwa ½—1° unter ihren Gefrierpunkt abzukühlen und dann erstarren zu lassen, weil sich dabei das Thermometer, erst rasch, dann langsam ansteigend, deutlich auf einen bestimmten Punkt einstellt, während bei langsamem Erstarren der Punkt unscharf wird. Denn bei langsam fortschreitender Erstarrung sinkt auch wegen der erfolgenden Konzentrationssteigerung die Temperatur langsam und stetig weiter und man weiß nicht, wann das Erstarren begonnen hat; die bei dem vorgeschriebenen Verfahren eintretende Konzentrationsänderung dagegen läßt sich, weil die Größe der Unterkühlung beobachtet werden kann, leicht als kleine Korrektur in Rechnung bringen. Die Unterkühlung (vgl. die Artikel „Aggregatzustände" und „Flüssigkeiten") macht

wenig Mühe, sofern keine Kristalle vorhanden sind; schwerer ist es oft, namentlich bei Stoffen mit großer Schmelzwärme, wie besonders Wasser, die Unterkühlung aufzuheben. Man kann das am sichersten durch Berühren des herausgehobenen Rührers mit einem vorrätig gehaltenen Kristall des Lösungsmittels (mit dem „Impfstift") bewirken.

Bei Präzisionsuntersuchungen müssen gewisse kleine Korrekturen beachtet werden. Für diese kann man sich auch einer anderen Methode bedienen, die darin besteht, daß man die Lösung mit sehr viel feinem Eis zusammenbringt, unter Rühren die Temperatur ermittelt und dann die Konzentration durch Analyse bestimmt.

Vom Drucke hängt der Effekt praktisch nicht merklich ab, weil der Schmelzpunkt durch Druck viel weniger verschoben werden kann als der Siedepunkt (vgl. die Artikel „Chemisches Gleichgewicht" und „Druck"). Bei Wasser ändert sich durch Erhöhung des Druckes von einer Atmosphäre auf zwei der Siedepunkt um 20°, der Gefrierpunkt um 0,0075°.

Die Konstanten E sind etwas kleiner als die der Siedepunktserhöhung. In der folgenden Tabelle haben die Zeichen die analoge Bedeutung wie in der früheren.

Stoff	T—273	E
Wasser	0	1,86
Benzol	5,4	5,12
Essigsäure	16,6	3,84
Phenol	42	7,9
Nitrobenzol	6	7,0
Phosphor	44	39,8
Antimontrichlorid	73,2	17,9

Als Beispiele für die Molargewichtsbestimmung seien folgende Zahlen angeführt, die analog den Siedepunktsergebnissen berechnet sind.

Methylacetat in Wasser

a	Δ	m
22,9	0,566	75,3
41,9	1,038	75,1
72,1	1,794	74,7
126,6	3,123	75,3

Kampfer in Benzol

a	Δ	m
41,2	0,140	147
75,2	0,260	148
125,5	0,430	150
184	0,630	150
279	0,945	152
395	1,320	153
589	1,970	153

Die chemisch abgeleiteten Molargewichte sind 74,0 resp. 152,0. Auch hier natürlich kann man, wie bei der Siedemethode, durch Umkehrung der Rechnung E und w bestimmen.

Eine grobe Abweichung von den beschriebenen einfachen Verhältnissen der Formeln (4a) und (5a) tritt dann ein, wenn das Lösungsmittel nicht rein ausfriert, sondern etwas von dem gelösten Stoffe mitnimmt. Solche Erscheinungen, die merkbarer Flüchtigkeit des gelösten Stoffes bei der Siedemethode entsprechen, sind denkbar und kommen nicht selten vor. Es handelt sich dabei um Ausfrieren eines homogenen Gemisches beider Stoffe, einer festen Lösung (vgl. unten S. 1035, sowie den Artikel „Lösungen"), nicht um ein gleichzeitiges Ausfrieren von zwei getrennt auftretenden Substanzen. Die Erweiterung der Theorie auf solche Fälle führt zu der Formel

(4b) $$\Delta = -(C_1 - C_2) . E$$

in der Δ und E ihre alte Bedeutung haben, C_1 dagegen die durch Mitausfrieren eines Teiles des gelösten Stoffes veränderte Konzentration der Lösung, C_2 die im gleichen Maße gemessene Konzentration des mitausgefrorenen Teiles in der erstarrten Masse, der festen Lösung, vorstellen. Man erkennt übrigens, daß, wenn ein relativ großer Teil des gelösten Stoffes mit ausfriert, C_2 größer werden kann als C_1. Das zeigt sich dann in einer Gefrierpunktserhöhung (vgl. die Artikel „Lösungen" und „Chemisches Gleichgewicht").

Andere Methoden. Auf die Sätze, die der Theorie der vorbeschriebenen Methoden zugrunde liegen, lassen sich noch andere Methoden begründen. Sie kommen aber praktisch wenig in Betracht und sollen darum hier nicht besprochen werden (vgl. „Verteilung zwischen zwei Lösungsmitteln" und „Löslichkeit" in dem Artikel „Lösungen").

4f) Ergebnisse der Molargewichtsbestimmung an Lösungen. Die Genauigkeit der Molargewichtsbestimmung nach den hier beschriebenen Methoden reicht vollkommen aus, um in Fällen der Auswahl zwischen verschiedenen Multiplen (vgl. S. 1019) die Entscheidung zu gestatten. Sie geht oft noch weit darüber hinaus, erreicht aber nie die Präzision, die bei der Atomgewichtsbestimmung („vgl. den Artikel Atomlehre") erzielt werden kann. Da aber die Hauptaufgabe solcher Methoden eben in einer solchen Entscheidung liegt, weil ja die Analyse und andere Gedankengänge bereits die Entscheidung zwischen wenige mögliche Fälle legen, so könnte die Frage, ob im gegebenen Falle einer mäßigen Abweichung des gefundenen Molargewichtes ein experimenteller Fehler oder eine neue Tatsache vorliegt,

meist als unwichtig betrachtet werden. Indessen kennt man verschiedene Umstände, die beweisen, daß man die Ergebnisse dieser Bestimmungen nicht in allen Fällen als maßgebend betrachten darf, und diese müssen nun besprochen werden.

Es wurde schon erwähnt, daß man immer möglichst nicht nur eine Konzentration, sondern eine ganze Serie untersuchen soll, und um dies bequem zu ermöglichen, sind gerade die beschriebenen Methoden ausgearbeitet worden. Wenn dann die Zahlen nicht alle gleich ausfallen, sondern einen Gang mit der Konzentration aufweisen, so ist das Ergebnis unter allen Umständen ein Zeichen, daß hier ähnliche Erscheinungen vorliegen wie sie oben (S. 1024) gelegentlich der anomalen Dampfdichten erwähnt worden sind. Wir müssen dann vermuten, daß zum mindesten der gelöste Stoff, eventuell auch das Lösungsmittel, nicht in allen Konzentrationen chemisch dasselbe Ding ist, daß also nicht das gemessen wird, was gemessen werden sollte. Zwei Beispiele mögen genügen, die sich auf Gefrierpunktsversuche beziehen.

Benzoesäure in Benzol			Chlorkalium in Wasser		
a	Δ	m	a	Δ	m
19,0	0,423	194	1,492	0,0704	39,4
32,8	1,077	210	2,985	0,1399	39,8
64,8	1,983	225	8,36	0,384	40,5
96,5	2,865	232	23,42	1,070	40,8
			35,5	1,605	41,2
			74,6	3,286	42,7

Das Molargewicht der Benzoesäure ist aus chemischen Gründen zu 122 anzunehmen. Der hier gefundene Wert ist weder 122 noch 2.122 = 244 noch 3.122 = 366 usf., sondern variiert mit steigender Konzentration von 122 nach 244 hin. Die hierfür allgemein angenommene Erklärung ist die, daß die gelöste Benzoesäure zum einen Teil als $C_6H_5COOH = 122$, zum anderen als $(C_6H_5COOH)_2 = 244$ vorhanden ist. Dann muß die molare Konzentration (Mol überhaupt vorhandener gelöster Substanz pro Kilogramm Lösungsmittel) kleiner sein als die, welche bei der gegebenen jeweiligen gewichtsmäßigen Zusammensetzung an Molen C_6H_5-COOH vorhanden sein würde, und nach Gleichung (2) also das scheinbare Molargewicht höher als 122. Dabei wird vorausgesetzt, daß die einzelnen gelösten Stoffarten in ihrer Wirkung auf den Gefrierpunkt (oder den Dampfdruck usw.) durch ihre chemische Verwandtschaft nicht beeinträchtigt werden, sondern die Summe der Effekte liefern, die jeder für sich in seiner Konzentration ergeben würde. Diesen Satz nennt man das Daltonsche Gesetz der Lösungen (vgl. die Artikel „Gas" und „Lösungen").

Die Rechtfertigung dieser Auffassung ergibt der Umstand, daß die beiden aus der gefundenen molaren Totalkonzentration rechnerisch ermittelten jeweiligen Einzelkonzentrationen das Massenwirkungsgesetz für die Reaktion $2.C_6H_5.COOH \rightleftharpoons (C_6H_5COOH)_2$ erfüllen, mithin ein bewegliches Gleichgewicht vorliegt (vgl. den Artikel „Chemisches Gleichgewicht").

Es ändern sich demnach die relativen Mengen von C_6H_5COOH und $(C_6H_5COOH)_2$ bei gleichem Gesamtgewicht, wenn dieses in verschiedenen Mengen Benzol, also zu verschiedener gewichtsmäßiger Konzentration gelöst wird.

Diese Erscheinung zeigt sich in hohem Maße abhängig vom Lösungsmittel; so ergibt z. B. Benzoesäure in Wasser fast genau das Molargewicht 122. Es kann je nach Konzentration und Lösungsmittel auch mehr als das Doppelte des erwarteten Molargewichts gefunden werden; dieser Fall ist nicht selten und entspricht dem des Phosphordampfes (vgl. S. 1024), der unter gewöhnlichen Umständen nahezu als P_4 zu formulieren ist. Auch von der Temperatur hängt die Erscheinung ab, und zwar wird die Siedepunktserhöhung im allgemeinen eine geringere Anomalie ergeben als die Gefrierpunktserniedrigung bei gleicher Konzentration im selben Medium; entsprechend der Tendenz jedes Stoffes, mit steigender Temperatur sich dem einfacheren Molargewichte anzunähern (wie das auch bei Gasen, konstanten Druck vorausgesetzt, geschieht).

Diese Erscheinung hat man Assoziation oder Komplexbildung genannt und, da sie vom Lösungsmittel stark beeinflußt wird, die Lösungsmittel als dissoziierende und assozierende unterschieden. Indessen sollte man nur stark und schwach dissoziierende Lösungsmittel unterscheiden, da die Tatsachen zu der Annahme drängen, daß die Stoffe im reinen Zustande noch viel stärker assoziiert sind als gelöst in anderen (vgl. den Artikel „Flüssigkeiten").

Die analoge Erscheinung, aber scheinbar gerade das Gegenteil, zeigt das zweite Beispiel, Chlorkalium in Wasser. Hier ergibt sich das Molargewicht nicht zu hoch, sondern zu niedrig, denn das niedrigste mögliche Molargewicht ist $KCl = 74,6$. Die Aufklärung dieser Fälle hat die Theorie der elektrolytischen Dissoziation von Arrhenius gebracht (vgl. dazu den Artikel „Dissoziation"). Die Anomalien beschränken sich nicht auf solche Fälle. Es ist bei der Begründung der Methoden (s. S. 1025) betont worden, daß die Lösungen ideal verdünnt sein müssen, wenn die Proportionalität des Effektes mit der Konzentration bestehen soll. Man hat aber

kein Kriterium über die Frage, wann eine Lösung ideal verdünnt ist, außer eben dieser Proportionalität selbst. Sobald die Kurve der Gefrierpunktserniedrigung in ihrer Abhängigkeit von der Konzentration keine Gerade mehr ist, bedarf die Theorie einer Ergänzung. In welcher Richtung diese zu suchen sei, ist eine vielumstrittene Frage. Man kann ebensowohl eine mechanische Attraktion der Molekeln der beiden Stoffe der Lösung annehmen, analog der van der Waalsschen Gastheorie (vgl. die Artikel „Gase“ und „Kinetische Theorie der Materie“), wie auch das Stattfinden chemischer Verbindung zwischen beiden. Diese letzte Annahme ist, vom chemischen Standpunkte betrachtet, der anderen, ihr formal gleichwertigen, vorzuziehen (vgl. S. 1022ff.). Einen speziellen, besonders wichtigen und viel diskutierten Fall bildet die Lehre von den Hydraten in wässeriger Lösung (vgl. den Artikel „Hydrate). Es ist von vornherein klar, daß die Bildung einer Verbindung unter allen Umständen die quantitativen Verhältnisse verschiebt.

Endlich ist noch der Fall zu erwähnen, daß ein gelöster Stoff nicht in wahrer, sondern in kolloider Lösung vorhanden ist (vgl. den Artikel „Disperse Gebilde“). Solche Erscheinungen zeichnen sich durch abnorm geringe Aenderungen des Gefrierpunktes (Dampfdruckes), also abnorm hohe scheinbare Molargewichte aus, und pflegen dann aufzutreten, wenn das normale aus chemischen Gründen angenommene Molargewicht schon sehr hoch ist.

5. Molargewicht von flüssigen Stoffen. Für die Ermittelung der Molargewichte von reinen flüssigen Stoffen gibt es bisher noch kein Prinzip vom Range des Avogadroschen, das, wie wir sahen, für verdünnte Gase (Gase unter geringem Druck) gilt und das auch den oben für verdünnte Lösungen aufgestellten Sätzen zugrunde liegt (vgl. den Artikel „Lösungen“). Wir haben es ja bei reinen flüssigen Stoffen nicht mit sehr geringen Konzentrationen zu tun, die dem Ende einer Mischungskurve (vgl. S. 1025) entsprechen und darum zu den durch sie verursachten Effekten praktisch proportional sind, oder — mit anderen Worten — bei denen nur die additiven und kolligativen Eigenschaften (vgl. den Abschnitt „Chemische Eigenschaften“ im Artikel „Chemie“) zur Geltung kommen, sondern mit unbegrenzt hohen. Bei solchen aber zeigt jede Substanz individuelles Verhalten (vgl. „Konstitutive Eigenschaften“ l. c.) und dann genügt nicht mehr ein allgemeines Gesetz mit einer universellen Konstanten, sondern für jeden Stoff tritt mindestens eine spezifische charakteristische Größe hinzu. Prinzipiell wäre die Existenz eines universellen Gesetzes für Flüssigkeiten denkbar, aber bekannt ist keines, und wahrscheinlich ist sie nur für den Fall, daß die Form des Gesetzes universell ist, die auftretenden Konstanten aber spezifische Werte haben.

Molare Oberflächenenergie. Es ist indessen ein Satz bekannt, auf den man sehr häufig eine Molargewichtsberechnung zu begründen pflegt. Er bezieht sich auf die Oberflächenspannung (vgl. den Artikel „Mechanochemie“) flüssiger Stoffe gegen ihren Dampf. Wenn γ die Oberflächenspannung ist, v das spezifische Volum der Flüssigkeit, M ihr Molargewicht, dann heißt Mv ihr Molarvolumen und $(Mv)^{\frac{2}{3}}.\gamma = \omega$ ihre molare Oberflächenenergie. Nun hat Eötvös den Satz aufgestellt, daß

$$\frac{\omega}{\tau - \delta} = K \tag{7}$$

wo $\tau - \delta$ die um eine kleine Korrektur δ veränderte Differenz τ der Beobachtungstemperatur gegen die kritische Temperatur (vgl. „Kritische Zustände“ in dem Artikel „Aggregatzustände“) bedeutet, eine universelle Konstante ist, in Worten: es ist der Temperaturkoeffizient der molaren Oberflächenenergie unabhängig vom Stoffe, sofern das richtige Molargewicht eingesetzt ist. Mißt man γ in Dynen pro cm, v in ccm pro Gramm, also ω in Erg, so ergibt sich die Größe K für ein ziemlich großes Temperaturintervall zu 2,0—2,3, wenn man den verschiedenen Stoffen im flüssigen Zustande das Molargewicht ihrer verdünnten Dämpfe zuschreibt. Wir wollen hier einige Beispiele anführen, in denen t die gewöhnliche Celsiustemperatur bedeutet; sie sind einer Arbeit von Ramsay und Shields (1893) entnommen, die den Satz zuerst experimentell begründet haben.

Man erkennt, daß die Werte von K bei weiter Entfernung von der kritischen Temperatur für jeden Stoff praktisch konstant sind, und daß die Mittelwerte verschiedener Stoffe einander nahe liegen. Spätere Untersuchungen, von denen die von Ph. A. Guye, P. Dutoit und ihren Schülern hervorzuheben sind, haben dies Resultat mit der Einschränkung bestätigt, daß der seit Ramsay und Shields angenommene universelle Mittelwert K = 2,121 nicht so genau wie hier gilt, sondern daß K wenigstens innerhalb der Grenzen von 2,0 bis etwa 2,3 variiert.

Immerhin stimmt das Eötvös-Ramsaysche Gesetz so weit, daß man sagen darf: Viele Flüssigkeiten zeigen, wenn das aus chemischen Gründen angenommene Molargewicht benutzt wird, in nicht zu großer Nähe der kritischen Temperaturen große Uebereinstimmung des Quotienten K. Daraus folgt, daß, wenn eines dieser Molargewichte der als

Aethyläther $\delta = 8.5$				Methylformiat $\delta = 6.0$				Benzol $\delta = 6.5$			
t	$\tau-\delta$	ω	K	t	$\tau-\delta$	ω	K	t	$\tau-\delta$	ω	K
20	166	363,7	2,19	20	188	383,9	2,04	80	202	425,1	2,10
40	146	317,4	2,17	40	168	343,2	2,04	100	182	384,0	2,11
60	126	272,8	2,16	60	148	302,5	2,04	120	162	341,6	2,11
80	106	229,5	2,16	80	128	262,0	2,04	140	142	299,0	2,10
100	86	186,9	2,17	100	108	221,2	2,04	160	122	256,9	2,10
120	66	143,6	2,18	120	88	180,0	2,04	180	102	213,8	2,09
140	46	100,4	2,18	140	68	138,3	2,03	200	82	172,5	2,10
160	26	58,6	2,25	160	48	97,1	2,02	220	62	131,0	2,11
180	6	19,9	3,32	180	28	57,3	2,04	240	42	89,0	2,12
				200	8	19,2	2,40	260	22	48,6	2,21
								270	12	28,8	2,40
								280	2	9,0	4,5

„normal" angenommenen Stoffe, etwa Benzol, aus irgendwelchen Gründen, wenigstens für den flüssigen Zustand, aufgegeben werden muß, auch die anderen entsprechend verändert, etwa verdoppelt werden müssen. Vorläufig hat man sich zu einer solchen Annahme nicht veranlaßt gesehen.

Es gibt nun aber viele Stoffe, für die der Koeffizient K nicht nur von dem Mittelwerte stark abweicht, sondern auch gar nicht konstant ist. Als Beispiele mögen Essigsäure, Aethylalkohol und Wasser dienen.

Essigsäure

t	τ	ω	$K = \frac{\omega}{\tau}$
20	301,5	371,2	1,23
130	191,5	261,5	1,36
140	181,5	250,5	1,38
160	161,5	226,3	1,40
180	141,5	200,2	1,42
200	121,5	174,9	1,42
220	101,5	146,9	1,45
240	81,5	117,5	1,44
260	61,5	86,0	1,40
280	41,5	54,8	1,32
300	21,5	25,1	1,17
320	1,5	0,82	0,55

Wasser

t	τ	ω	$K = \frac{\omega}{\tau}$
30	345	476,0	1,38
40	335	466,0	1,39
60	315	446,4	1,41
80	295	425,9	1,44
100	275	403,7	1,47
120	255	380,4	1,49
140	235	356,8	1,52

Aethylalkohol

t	τ	ω	$K = \frac{\omega}{\tau}$
20	223,1	331,0	1,48
40	203,1	307,3	1,51
60	183,1	284,8	1,56
80	163,1	261,2	1,60
100	143,1	235,0	1,64
120	123,1	208,0	1,69
140	103,1	178,8	1,73
160	83,1	147,2	1,77
180	63,1	112,6	1,79
200	43,1	75,7	1,75
220	23,1	39,2	1,76
240	3,1	3,7	1,2

Hier ist von Konstanz keine Rede und der Gang der Quotienten $\frac{\omega}{\tau}$ ist viel größer als bei den drei erstzitierten Stoffen, auch dann, wenn man bei diesen die angegebene kleine Korrektur δ der Vergleichbarkeit wegen wegläßt, wobei dann die Quotienten $\frac{\omega}{\tau}$ folgende Werte annehmen:

Aethyläther		Methylformiat		Benzol	
t	$\frac{\omega}{\tau}$	t	$\frac{\omega}{\tau}$	t	$\frac{\omega}{\tau}$
20	2,08	20	1,98	80	2,04
40	2,05	40	1,97	100	2,04
60	2,03	60	1,96	120	2,03
80	2,00	80	1,96	140	2,01
100	1,98	100	1,94	160	2,00
120	1,93	120	1,92	180	1,97
140	1,84	140	1,87	200	1,95
160	1,70	160	1,80	220	1,92
180	1,37	180	1,68	240	1,83
		200	1,37	260	1,70
				270	1,56
				280	1,06

Man hat wegen dieser Anomalie, die namentlich bei Stoffen mit Hydroxyl- oder Carboxylgruppen, Doppelbindungen (vgl. den Artikel „Konstitution") und auch anderen, chemisch als ungesättigt aufgefaßten Stoffen auftritt, diese Stoffe als „assoziierte" von den normalen unterschieden und geschlossen, daß diesen das normale Molargewicht zuzuschreiben sei, den „assoziierten" ein Mehrfaches davon. Besonders nahe liegt dieser Schluß bei Essigsäure, die bekanntlich als Dampf ein zu hohes Molargewicht zeigt (s. S. 1024).

Um den Betrag dieser Assoziation zu berechnen, benutzt man die von Ramsay und Shields aufgestellte Näherungsformel

$$(8)\qquad \frac{2{,}12}{K} = x^{\frac{2}{3}}$$

Hier ist K der jeweilige Quotient $\frac{\omega}{\tau}$, der für „normale" Stoffe zu 2,12 angenommen wird, x der „Assoziationsgrad, das Verhältnis des aus der Anomalie abgeleiteten wahren zum theoretischen (kleineren) Molargewichte. Die einfache Begründung der Formel, die auf bestimmten neuen und nicht sehr sicher fundierten Annahmen beruht, mag hier übergangen werden. Mit ihrer Hilfe hat man berechnet, daß in den meisten bisher beobachteten Fällen von Assoziation ein Assoziationsgrad bis etwa 4 angenommen werden soll, also Wasser z. B. nicht $H_2O = 18$, sondern etwa $(H_2O)_4 = 72$ zu formulieren wäre, natürlich abhängig von der Temperatur. Doch ist diese Zahl x immer nur ein mittlerer Wert, und man nimmt an, daß sowohl höhere als auch tiefere Komplexe vorhanden sind.

Diese Betrachtungen spielen eine große Rolle bei der Frage nach dem Molargewicht flüssiger Stoffe. Die auf ihnen beruhenden Schlüsse sind sehr wenig sicher, denn die universelle Konstanz von K würde, wie ein Blick auf die Formel (7) sofort lehrt, nur beweisen, daß die verglichenen Stoffe sich relativ gleich verhalten, also bezüglich ihrer Molargewichte annähernd gleichgroße Multipla der einfachen aus den Gasgrenzgesetzen abgeleiteten sind, nicht aber, daß sie diesen gleich sind. Es kommt hinzu, daß die Beobachtungen bei weitem nicht so genau sind, als meist angenommen wird, und die Unsicherheit des Fundamentalwertes $K = 2{,}12$ mindestens etwa 10% beträgt. Jedenfalls ist ein bindender Schluß auf das Molargewicht mittels des Eötvös-Ramsayschen Satzes nicht zu gewinnen, und es bleibt nur die Möglichkeit der Unterscheidung von normalen und abnormen Stoffen übrig. Dabei ist als wichtig zu beachten, daß dieser Unterschied sich bezüglich anderer Eigenschaften wiederfindet (vgl. den Artikel „Stöchiometrie" und „Flüssigkeiten"), daß er also wenigstens qualitativ als allgemein anerkannt werden muß. Dagegen bleibt die quantitative Deutung bezüglich des Molargewichts offen, und statt der Annahme, daß flüssiges Benzol $C_6H_6 = 78$ sei, flüssiges Wasser aber $(H_2O)_4$, ist auch die andere möglich, daß das Benzol $(C_6H_6)_x$, das Wasser $(H_2O)_y$ ist, wobei x und $y \gtrless x$ nur empirische Mittelwerte vorstellen, alle Stoffe also als Gemische ihrer verschiedenen Polymeren in verschiedenen Verhältnissen zu betrachten sind.

Weitere Relationen, aus denen sich Molargewichte der Flüssigkeiten ableiten lassen, können gemeinsam für alle Aggregatzustände besprochen werden (vgl. unten S. 1035).

6. Molargewichte fester Stoffe. Isomorphie. Für die festen Stoffe ist als Kriterium über die relative Größe des Molargewichts die von Mitscherlich 1819 aufgefundene Erscheinung der Isomorphie sehr viel verwertet worden. Isomorphie (s. diese in dem Artikel „Kristallochemie") nennt man die Formähnlichkeit kristallisierter Stoffe, ferner auch die Fähigkeit zur Bildung von Mischkristallen.

Aus Gründen, die man zuerst aus der Molekularhypothese hergeleitet hat (s. unten), wurde und wird angenommen, daß die isomorphe Vertretung eines Stoffes in seinem Kristalle durch einen anderen in molaren Verhältnissen erfolgt; daraus ergibt sich die Möglichkeit der Berechnung des Molargewichtes des einen, wenn das des anderen als bekannt angenommen ist. Wenn also gefunden wird, daß Baryumcarbonat und Strontiumcarbonat isomorph sind, und man das Molargewicht von Baryumcarbonat zu $BaCO_3 = 137 + 12 + 3.16 = 197$ annimmt, so muß das des Strontiumcarbonats $SrCO_3 = Sr + 12 + 3.16$ sein. Aus der Analyse, die das Verhältnis von $Sr : CO_3$ feststellt, folgt dann $Sr = 87{,}5$, also $SrCO_3 = 147{,}5$. Wenn aber Baryumcarbonat nicht das Molargewicht 197, sondern $2.197 = 394$ hat, so folgt auch für das Strontiumcarbonat $2.147 = 294$.

Diese Beziehung, die schon äußerlich ihre Grenze in der Unvollkommenheit der Isomorphie (Homoiomorphie, unvollkommene Mischbarkeit) (vgl. „Isormophie" in dem Artikel „Kristallochemie") hat, erlaubt in manchen zweifelhaften Fällen eine Entscheidung, insbesondere ist sie wie die Dampfdichtebestimmung in solchen Fällen von Nutzen gewesen, wo es sich um die Entscheidung handelte, ob ein Stoff ein Element mit zwei oder mit drei Valenzeinheiten (s. den Artikel „Valenzlehre") enthalte; eine Frage, die z. B. beim Beryllium lange Zeit unentschieden geblieben ist. Für sich allein gibt sie kein sicheres Kriterium, sondern bedarf der Unterstützung durch andere Rela-

tionen. Auch liefert sie nur Verhältniszahlen, entscheidet also nicht über die Fragen der Komplexitätserscheinungen (s. S. 1034).

7. **Feste Lösungen.** Wenn aber ein isomorphes Gemisch zweier Stoffe, oder allgemeiner gesprochen eine feste Lösung (vgl. den Artikel „Lösungen") vorliegt, so besteht für den Fall, daß diese hochverdünnt ist, also den einen Stoff B in relativ geringer Menge gegenüber dem anderen A enthält, die Möglichkeit, analog wie bei den flüssigen verdünnten Lösungen (s. den Artikel „Lösungen") auf das Molargewicht von B zu schließen. Die theoretische Begründung der maßgebenden Formeln ist völlig identisch mit der für Flüssigkeiten geltenden; man gewinnt sie am besten mit Hilfe der experimentell begründeten Vorstellung, daß ein jeder feste Stoff, selbst Kohle und Gold, einen Dampfdruck hat. Dann ergibt sich die Formel (1) S. 1026) unter denselben Voraussetzungen wie dort. Messungen solcher Dampfdrucke oder Depressionen stoßen oft auf Schwierigkeiten, aber in einigen Fällen sind sie einwandfrei durchgeführt; übrigens kann an ihre Stelle auch die der Aenderung von „Umwandlungspunkten" (vgl. den Artikel „Chemisches Gleichgewicht") oder von Löslichkeiten in einem flüssigen Lösungsmittel treten. So hat man z. B. durch Messung des Teilungsverhältnisses (vgl. die Artikel „Chemisches Gleichgewicht" und „Lösungen") von β-Naphtol zwischen Wasser und festem Naphtalin gefunden, daß die Konzentration im Wasser, wo das β-Naphtol der Formel $C_{10}H_8O$ entspricht, proportional der Quadratwurzel der Konzentration des Naphtols im Naphtalin ist; daraus folgt auf Grund der Lösungsgesetze, speziell des Massenwirkungsgesetzes (vgl. den Artikel „Chemische Kinetik"), daß dem in viel festem Naphtalin gelösten β-Naphtol die Formel $(C_{10}H_8O)_2$ zuzuschreiben ist.

8. **Allgemeine Regeln für die Molargewichtsbestimmung beliebiger reiner Stoffe.** Es ist klar, daß eine Molargewichtsberechnung auf jede Beziehung begründet werden kann, in der das Molargewicht auftritt. Ein Beispiel haben wir oben an der molaren Oberflächenenergie gehabt, und da jede Eigenschaft eines Stoffes in Verbindung mit seinem Molargewichte gebracht werden kann, so kann auch jede zur Berechnung des Molargewichtes dienen, wenn sich eine brauchbare generelle Formel finden läßt. Wir wollen die in dieser Richtung gemachten Versuche bezüglich einiger wichtiger Eigenschaften besprechen.

8a) Molarvolum. Die Volumverhältnisse der Gase sind bereits (S. 1019) erörtert worden; die hier geltende allgemeine Beziehung lautet einfach: Unter gleichen Bedingungen von Druck und Temperatur sind die Molarvolume aller idealen Gase einander gleich (s. oben). Bei Flüssigkeiten und festen Stoffen stößt die Anwendung dieses Satzes auf Schwierigkeiten, weil bei diesen die bei idealen Gasen einflußlosen konstitutiven Verhältnisse, d. h. die spezifischen Charakteristika der einzelnen Stoffe, stark in den Vordergrund treten und das kolligative, d. h. das lediglich von der molaren Konzentration, ohne Rücksicht auf die besondere chemische Natur der Stoffe, bestimmte Verhalten überdeckt. Es tritt demnach bei den Volumverhältnissen flüssiger und fester Stoffe die Konstitution der Stoffe so stark hervor, daß man ganz andere Regeln findet als die Gasgesetze. Die Volummessung flüssiger und fester Stoffe wird in den Artikeln „Raummessung" und „Dichte" behandelt; wir beschränken uns hier auf die Ergebnisse. Da der Druck sehr geringen, die Temperatur nur wenig größeren Einfluß hat, so genügt der Vergleich der festen Stoffe bei den gewöhnlichen Umständen, nur für flüssige Stoffe ist eine andere Wahl getroffen worden.

Flüssigkeiten. Da flüssige Elemente zu wenig zahlreich sind, kommen nur Verbindungen in Betracht. Sie werden nicht bei gleicher Temperatur verglichen, sondern nach dem Vorschlage von H. Kopp bei ihren Siedepunkten. Dann findet man folgende Regelmäßigkeit, wenn v das beim Siedepunkte eingenommene Volum (in ccm) von 1 Mol ist, wobei das Molargewicht anderweit abgeleitet ist.

Ester	v	Diff.
Methylformiat	62,8	
Methylacetat	83,8	21,0
Methylpropionat	104,9	21,1
Methylbutyrat	126,8	21,9
Methylvalerat	149,1	22,3
Methylcapronat	172,2	22,3
Methylheptylat	196,2	24,0
Methyloctylat	220,1	23,9

Alkohole	v	Diff.
Aethylalkohol	42,7	
Aethylalkohol	62,2	19,5
n-Propylalkohol	81,3	19,1
n-Butylalkohol	101,7	20,4
n-Amylalkohol	123,4	21,7
n-Hexylalkohol	146,3	22,9
n-Heptylalkohol	168,3	22,0
n-Octylalkohol	190,6	22,3

Man erkennt hier eine fast konstante Differenz zwischen je zwei Gliedern dieser homologen Reihen (vgl. die Artikel „Or-

ganische Chemie" und „Systematik"). Es entspricht also der Gruppe CH_2 die Größe von rund 21 ccm. Diese Differenz findet sich auch bei anderen Reihen wieder, und analog hat man für andere Radikale und für Elemente solche charakteristische Volumgrößen ermittelt. Daraus kann man dann die Molarvolume und also die Molargewichte berechnen, die noch unbekannte Stoffe auf Grund ihrer chemischen Analyse haben sollten. Doch ist die Formel nicht rein additiv, sondern zeigt deutlich konstitutive Einflüsse; man berücksichtigt diese durch verschiedene Werte für Carboxyl- und Aethersauerstoff, drei- und fünfwertigen Stickstoff, Zusatzglieder für mehrfache Kohlenstoffbindung usw. Man kommt in Anbetracht der unvollkommenen Gültigkeit solcher Beziehungen mit einer Formel aus, in der folgende Raumeinheiten angenommen sind:

Für		Für	
C	11,0	J	37,5
$O_{carbonyl}$-	12,2	S	22,6
O_{aether}-	7,8	N	7,0
H	5,5	P dreiwertig	26
Cl	22,8	P fünfwertig	19
Br	27,8	C-Doppelbindung	1,5

Hiernach müßte also z. B. für Chloral, C_2HCl_3O, herauskommen $2.11,0+5,5+3.22,8+12,2=108,1$, gefunden ist 108,1, Propylamin C_3H_9N sollte 86,5 geben, gefunden ist 85,6.

Es ist klar, daß diese ziemlich nahe zutreffende Regel für unbekannte Stoffe zur Entscheidung dienen kann, wenn anderweit Zweifel bestehen, z. B. ob Polymerie (vgl. den Artikel „Isomerie") vorliegt. Absolute Werte kann man natürlich nicht bekommen, denn wenn alle Flüssigkeiten zehnfach oder hundertfach polymer wären, würden relativ diese Beziehungen doch bestehen bleiben.

Feste Stoffe. Für diese hat man ganz analoge Beziehungen gefunden. Hier vergleicht man bei gewöhnlicher Temperatur und kann auch auf die Elemente zurückgehen. Wenn man die Atomgewichte der Elemente gleich ihren Molargewichten annimmt, so ergibt sich die Tabelle, welche für die Atomvolumina angegeben worden ist (vgl. Bd. I S. 721).

Additive Berechnungen der Molarvolumina auf Grund dieser Zahlen ergeben keine gute Uebereinstimmung mit dem Experimente. Besser sind die Ergebnisse einer auf die Unterschiede der Verbindungen selbst begründeten Rechnung, analog der für die Flüssigkeiten angegebenen. Praktische Bedeutung für die Molargewichtsbestimmung haben diese besonders von H. Schröder (1878) in großem Umfange aufgestellten Berechnungen aber kaum. Es scheint, daß man nicht die Volumina, sondern die Dichten vergleichen sollte.

8b) Molarwärme. Eine sehr bekannte und vielbenutzte Regel ist dagegen das Gesetz der Molarwärmen von Joule-Kopp-Neumann, das die Erweiterung des Dulong-Petitschen Gesetzes der Atomwärmen bildet (vgl. den Artikel „Atomlehre"). Es lautet dahin, daß bei festen und teilweise auch bei flüssigen Stoffen die Molarwärme gleich der Summe der Atomwärmen ist und daß analog konstituierte Stoffe gleiche Molarwärme haben. Die Zahlen zeigen folgendes Bild, wenn wir die bereits bekannten Atomwärmen benutzen und dabei für Cl 8,0 bei flüssigen Stoffen, 6,9 bei festen, analog für Brom 8,6 unf 7,0, für Sauerstoff den vermuteten Wert 4,2, für Stickstoff 6,0 setzen. Unter „gef." stehen die mit dem chemisch angenommenen Molargewichte multiplizierten gemessenen spezifischen Wärmen, unter „ber." die der Formel entsprechend durch Addierung der Atomwärmen ermittelten.

Oxyde	ber.	gef.	Sulfide	ber.	gef.	Sulfate	ber.	gef.
PbO	10,6	12,0	PbS	11,6	10,5	$PbSO_4$	28,4	25,2
CuO	10,2	10,2	FeS	11,2	12,1	$CaSO_4$	29,2	24,0
HgO	11,0	11,5	NiS	11,6	10,3	$CuSO_4$	28,0	29,5
ZnO	10,3	10,0	HgS	11,8	12,0	$ZnSO_4$	28,1	28,1
As_2O_3	25,0	25,2	SnS	11,9	12,8	$NiSO_4$	28,4	33,4
Fe_2O_3	24,6	25,0	ZnS	11,3	9,3(?)	$MgSO_4$	27,8	27,0
Bi_2O_3	25,2	28,4	Cu_2S	17,2	19,1	K_2SO_4	35,8	33,6
SnO_2	14,9	13,9	Ag_2S	17,4	17,9	Na_2SO_4	36,0	28,0
SiO_2	13,2	10,2	Sb_2S_3	28,6	25,6			
Cu_2O	16,2	16,0	CoSAs	17,6	16,0			
			Ag_3SbS_3	39,8	41,0			

Nach diesen Tabellen bestätigt sich das Gesetz der Additivität der Atomwärmen (Gesetz von Joule) mit leidlicher, oft guter Annäherung, noch besser oft das zweite über analog konstituierte Stoffe (Gesetz von Neumann). Die Vergleichbarkeit der Zahlen ist durch den Umstand beeinträchtigt, daß sie sich nicht immer auf gleiche Temperaturen

Chloride	ber.	gef.
$AlCl_3$	26,9	25,6
$AsCl_3$	30,2	32,3
PCl_3	29,3	28,8
$CaCl_2$	21,0	18,2
$PbCl_2$	20,2	18,2
$MgCl_2$	19,6	18,3
$ZnCl_2$	19,9	18,5
$HgCl_2$	20,4	17,4
$SnCl_2$	20,3	19,5
KCl	13,7	12,8
NaCl	13,9	12,6
CuCl	13,9	13,7
AgCl	13,0	13,1
HgCl	13,5	12,3
LiCl	13,5	12,0
$SnCl_4$	38,5	39,6
K_2PtCl_6	61,5	55,2
K_2SnCl_6	61,7	55,0
K_2ZnCl_4	47,5	44,8

Bromide	ber.	gef.
KBr	13,8	13,5
AgBr	13,1	13,9
PbBr	20,4	19,7

Jodide	ber.	gef.
PbJ_2	20,2	19,7
HgJ_2	20,4	19,1
KJ	13,7	13,6
NaJ	13,9	13,3
HgJ	13,5	12,9
CuJ	12,9	13,3
AgJ	13,0	14,5

Nitrate	ber.	gef.
$Pb(NO_3)_2$	43,6	36,5
$AgNO_3$	22,3	24,4
$NaNO_3$	25,6	23,0
KNO_3	25,4	24,3

Chlorate	ber.	gef.
$KClO_3$	26,3	23,8
$KClO_4$	30,5	26,3

Carbonate	ber.	gef.
$PbCO_3$	21,4	19,0
$ZnCO_3$	20,3	18,5
$CaCO_3$	21,4	19,0
K_2CO_3	27,8	29,5
Na_2CO_3	28,2	26,5

Chromate	ber.	gef.
$PbCrO_4$	28,9	29,0
K_2CrO_4	36,2	36,5

beziehen; auch kommen experimentelle Unsicherheiten ins Spiel. Die Regeln sind aber zur Entscheidung bei neuen Stoffen verwendbar, ja sie haben in früheren Zeiten dabei eine wichtige Rolle gespielt.

Es sei die Frage zu entscheiden, ob Kupferchlorür CuCl oder $CuCl_2$ und demnach Kupferchlorid $CuCl_2$ oder $CuCl_4$ zu schreiben, das Atomgewicht des Kupfers also 63,6 mit einfacher und doppelter, oder 127,2 mit doppelter und vierfacher Wertigkeit (vgl. den Artikel „Valenzlehre") sei. Für das Chlorür ist als Molarwärme entweder 99,0. 0,138=13,7 für die Formel CuCl oder 198.0,138 = 27,4 für $CuCl_2$ zu erwarten. Die als ihrer Formel nach bekannt angenommenen einwertigen Chloride zeigen im Mittel 13 (s. Tabelle), die zweiwertigen 18. Nur der erste Wert paßt also zu einer Gruppe, also ist Cu = 63,6 und nicht 127,2 anzunehmen.

Natürlich sagt auch diese Regel nichts darüber aus, ob die Formeln wirklich den „wahren" Molargewichten gleich oder in einem für alle gleichen Verhältnisse falsch sind, sondern sie ordnet nur alle Stoffe in ein System ein.

Für flüssige Stoffe sind die aufgefundenen Regeln nicht so einfach. Der Einfluß der chemischen Konstitution tritt bei ihnen stärker hervor, und demzufolge lauten also die Regeln nicht rein additiv. Der Fall liegt ebenso wie der der Dichte. Die organischen Substanzen zeigen in homologen Reihen Differenzen, die nur in erster Annäherung konstant sind, auch gewisse andere Regeln lassen sich erkennen. Näheres darüber siehe in den Artikeln „Stöchiometrie" und „Flüssigkeiten".

8c) Verdampfungswärme. Regel von Pictet-Schiff-Trouton. Eine wichtige und neuerdings auch mehrfach theoretisch diskutierte Regel besteht bezüglich der Verdampfungswärme. Sie ist von Pictet, von Schiff und von Trouton aufgestellt worden und lautet dahin, daß die beim Siedepunkte gemessene molare Verdampfungswärme proportional der Siedetemperatur ist, oder — mit anderen Worten — daß der Quotient der molaren Verdampfungswärme beim Siedepunkte und der Siedetemperatur, die molare Verdampfungsentropie (vgl. den Artikel „Energielehre"), eine universelle Konstante ist. Ist M das Molargewicht, Q die Verdampfungswärme pro Gramm in g-cal. (vgl. den Artikel

„Thermochemie“), bei der absoluten Siedetemperatur T, so ist hiernach

$$\frac{M.Q}{T} = H \quad \ldots\ldots\ldots \quad (9)$$

Folgende Zahlen illustrieren diese Formel:

	M	Q	T	H
Brom	160	43,7	336	20,8
Chlor	709	69,0	240	20,4
Quecksilber	200	68	631	21,6
Tetrachlorkohlenstoff .	154	46,4	349	20,4
Phosphortrichlorid . .	137	51,4	351	20,1
Schwefelkohlenstoff .	76	86	319	20,4
Schwefelsäure	98	122	603	19,9
Sulfurylchlorid . . .	135	52,4	341	20,7
Aethyläther	74	88	308	21
Aethylbromid	109	60,4	311	21,2
Aethylformiat	74	92	326	20,8
Propylformiat	88	85	354	21,1
Iso-Butylformiat . . .	102	77	371	21,1
Iso-Amylformiat . . .	116	71,7	394	21,1
Chloroform	119,5	58	334	20,0
Hexan	86	79,4	341	20,0
Heptan	100	74	371	20,0
Octan	114	70,9	398	20,3
Benzol	78	93,2	353	20,6
Toluol	92	83,5	384	20,0
m-Xylol	106	78,3	413	20,1
Anilin	93	104	456	21,2

	M	Q	T	H
Bortrichlorid . . .	117,5	38,3	290	15,5
Schwefeldioxyd . .	64,0	96,2	263	23,4
Schwefelchlorür (S_2Cl_2)	135	493	411	16,2
Wasser	18,0	536	373	25,9
Aceton	58	125	330	22,1
Methylalkohol . . .	32,0	267	338	25,2
Aethylalkohol . . .	46,0	201	351	26,4
Propylalkohol . . .	60,0	164	369	26,6
Ameisensäure . . .	46,0	120	374	14,8
Essigsäure	60,0	89,8	392	13,8
Propionsäure. . . .	74,0	91,4	430	15,7
Buttersäure	88,0	114	437	17,7
Dichloressigsäure . .	129	79,1	411	24,9
Acetophenon . . .	120	77,3	477	19,5
Nitrobenzol	119	79,2	425	22,2
Sauerstoff	32	58	85	21,8

Aus diesen Beispielen ergibt sich, daß im Mittel H = 20,8 für solche Stoffe ist, die sich auch bezüglich anderer stöchiometrischer Regeln normal verhalten. Man kann also die Formel (9) zur Bestimmung des Molargewichts verwenden. Indessen zeigt die große Zahl der Ausnahmen, daß auch grobe Irrtümer auftreten können. Diese Ausnahmen treten auf bei Stoffen, die wie Essigsäure abnorm hohe Dampfdichte haben, in diesem Falle pflegen die Werte von H kleiner als 20 zu sein; sie finden sich aber auch, wenn, wie beim Wasser, der Dampf ein nahezu ideales Gas ist. In diesem zweiten Falle verhält sich aber die Flüssigkeit bezüglich anderer Regeln auch abnorm.

Refraktion. Sehr genaue Prüfung erlauben die für optische Eigenschaften, insbesondere das Lichtbrechungsvermögen (vgl. den Artikel „Lichtbrechung“) aufgestellten Formeln. Man hat für diese verschiedene Beziehungen zum Molargewicht aufgestellt, die wichtigste und theoretisch bestbegründete davon ist die Formel von L. Lorenz und H. A. Lorentz. Bei ihrer Anwendung, wie bei der jeder anderen Formel, ist Voraussetzung, daß nur monochromatisches Licht und zwar für alle in Frage stehenden Stoffe das gleiche benutzt wird. Am richtigsten ist es, die Brechungsindizes (vgl. die Artikel „Lichtbrechung“ und „Spektroskopie“) für unendlich lange Wellen zu vergleichen. Die Formel lautet

$$\frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{1}{d} = B \qquad (10)$$

wenn n den Brechungsindex, d die Dichte bedeutet. Die Beziehung zum Molargewichte ergibt sich dadurch, daß die Dichte d in molarem Maße gemessen wird, d. h. gleich dem reziproken Werte des Molarvolumens M.v ist. Man nennt B dann das Refraktionsäquivalent oder die Molarrefraktion des Stoffes.

Für ideale Gase ist unter gleichen Umständen von Druck und Temperatur folgendes gefunden worden (Temperatur 18°, Druck 760 mm, Natriumlicht). Das Volum v ist in ccm pro Gramm gerechnet, es ist also für alle Gase $v = \frac{23{,}9.10^3}{M}$ bei 18°, und danach $d = \frac{1}{M.v}$, wo M das Molargewicht bedeutet.

Die Formel (10) vereinfacht sich hier, wegen der geringen Abweichung der n-Werte von 1,

$$\text{zu } B = \frac{2.23{,}9.10^3}{3}.(n-1) = 15{,}9.10^3.(n-1).$$

(Tabelle siehe nächste Seite an zweiter Stelle.)

Unter B_{corr} stehen die für die Anomalie des Gaszustandes korrigierten Werte, die sich zu B verhalten wie die beobachteten Dichten zu den hier angenommenen.

Berechnet man für den im Elementarzustande nicht meßbaren Kohlenstoff und den wegen stark abnormer Dampfdichte nicht berechenbaren Schwefel die Atomrefraktionen A nach der Additionsregel aus den Werten ihrer Verbindungen, so ergibt sich folgendes:

Kohlenstoff berechn. aus	A
CO	3,17
CO_2	2,90
C_2N_2	4,17
HCN	3,50
CCl_4	4,0
$CHCl_3$	4,0
CH_4	2,6
C_2H_4	3,5
CH_3Cl	4,5

Schwefel berechn. aus	A
H_2S	7,7
SO_2	6,4

Hierbei ist natürlich für jedes Element die „Atomrefraktion" A angenommen, die, wie aus den Formeln hervorgeht, stets gleich der halben Molarrefraktion des zweiatomigen Elements ist.

Nehmen wir danach als Atomrefraktion an

H	1,11
O	2,17
N	2,38
C	3,0 (?)
Cl	6,6

so berechnen sich folgende Werte $B_{ber.}$ für Verbindungen im gleichen Gaszustande, während B beobachtet ist (Tab. s. links unten).

	Formel	n	B	Bcorr.
Wasserstoff	H_2	1,000 140	2,22	2,22
Sauerstoff	O_2	1,000 271	4,34	4,34
Stickstoff	N_2	1,000 298	4,76	4,76
Kohlenoxyd	CO	1,000 335	5,34	5,34
Kohlendioxyd	CO_2	1,000 454	7,24	7,20
Schwefelwasserstoff	H_2S	1,000 623	9,98	9,90
Stickoxydul	N_2O	1,000 516	8,23	8,16
Stickoxyd	NO	1,000 297	4,73	4,73
Schwefeldioxyd	SO_2	1,000 686	10,95	10,70
Chlor	Cl_2	1,000 773	12,32	12,21
Brom	Br_2	1,001 132	18,10	—
Ammoniak	NH_3	1,000 373	5,95	5,86
Chlorwasserstoff	HCl	1,000 447	6,97	6,92
Bromwasserstoff	HBr	1,000 573	9,15	—
Cyan	$(CN)_2$	1,000 822	13,10	13,04
Cyanwasserstoff	HCN	1,000 438	6,99	—
Quecksilber	Hg	1,000 058	8,8	—
Chlorkohlenstoff	CCl_4	1,001 779	28,4	—
Chloroform	$CHCl_3$	1,001 464	23,4	—
Methan	CH_4	1,000 444	7,08	7,03
Aethylen	C_2H_4	1,000 723	11,5	11,3
Methylchlorid	CH_3Cl	1,000 870	13,86	—
Phosphor	P_4(?)	1,00 137	21,9	—
Schwefel	S_3	1,00 164	26,1	—
Phosphortrichlorid	PCl_3	1,00 174	27,9	—

	Formel	B	Bber.
Acetaldehyd	C_2H_4O	13,9	12,6
Aceton	C_3H_6O	17,5	17,8
Aethylacetat	$C_4H_8O_2$	22,5	25,1
Aethyläther	$C_4H_{10}O$	24,6	25,3
Aethylalkohol	C_2H_6O	14,1	14,8
Allylchlorid	C_3H_5Cl	23,1	21,1
Allylen	C_3H_4	19,0	13,4 (!)
Amylen	C_5H_{10}	27,0	26,0
Benzol	C_6H_6	29,1	24,6 (!)
Phosgen	$COCl_2$	18,2	18,4
Methylacetat	$C_3H_6O_2$	19,0	19,4
Methylalkohol	CH_4O	10,0	9,6
Methylpropionat	$C_4H_8O_2$	23,5	25,2
Pentan	C_5H_{12}	27,3	28,2
Propylen	C_3H_6	19,5	15,6 (!)
Wasser	H_2O	4,24	4,38

Wir finden also sehr oft gute Uebereinstimmung. Die abweichenden Stoffe erlauben wohl nur zum Teil die Erklärung auf Grund abnormer Dampfdichte. Nicht unmöglich ist die Erklärung durch die Annahme, daß bei der Messung eine an der Wand kondensierte dünne Dampfschicht zu hohe Werte von B verursacht hat, doch darf man dies ohne genaue Prüfung nicht als sicher annehmen und muß also vorläufig das Vorhandensein konstitutiver Einflüsse zugeben. Die Molargewichtsberechnung verliert dadurch stark an Zuverlässigkeit.

Flüssige Stoffe haben folgendes bei Beobachtung unter gleicher Temperatur im Na-Licht ergeben. Die Formel (10) lautet hier, $\frac{n^2-1}{n^2+2} \cdot \frac{M}{\delta} = B$, wo δ die Dichte ist.

	Formel	Temperat.	n	δ	B
Brom	Br_2	13°	1,035	3,15	23,0
Phosphor	P_4	44°	2,06	1,76	43,1
Schwefel	S_8	110°	1,93	1,81	19,6
Phosphortrichlorid	PCl_3	15,4°	1,525	1,60	28,0
Schwefeldioxyd	SO_2	20°	1,410	1,94	8,15

	Formel	Temperat.	n	δ	B
Acetaldehyd	C_2H_4O	20	1,333	0,780	11,5
Aceton	C_3H_6O	20	1,364	0,800	16,1
Aethylacetat	$C_4H_8O_2$	16	1,374	0,903	22,2
Aethyläther	$C_4H_{10}O$	20	1,354	0,714	22,6
Aethylalkohol	C_2H_6O	18	1,362	0,802	12,7
Allylchlorid	C_3H_5Cl	20	1,415	0,938	27,1
Amylen	C_5H_{10}	20	1,376	0,648	24,7
Benzol	C_6H_6	20	1,500	0,879	34,0
Methylacetat.	$C_3H_6O_2$	20	1,363	0,904	18,2
Methylalkohol	CH_4O	20	1,329	0,792	8,15
Pentan	C_5H_{12}	16	1,358	0,625	25,2
Wasser	H_2O	20	1,333	1,00	3,65

Diese Beispiele zeigen, daß die Molarrefraktionen sich fü\ı Dampf und Flüssigkeit im allgemeinen nahezu gleich ergeben, daß also die aus den gasförmigen Elementen abgeleiteten Atomrefraktionen die Molarrefraktionen der flüssigen Stoffe meist mit guter Annäherung zu berechnen erlauben. Man darf aber aus dieser Uebereinstimmung nicht schließen, daß Dampf und Flüssigkeit gleiche Molargewichte haben, denn wir haben von vornherein die Molargewichte der Flüssigkeit passend gewählt. Die Gleichheit beweist nur, daß das auf gleiche Gewichtsmengen bezogene Refraktionsäquivalent für Dampf und Flüssigkeit gleich ist.

Beispiel. Ein Mol Methylacetatdampf gleich 74,0 g mit dem Brechungsexponenten 1,00119 nimmt 23,9.10³ ccm ein (wenn es ein genau ideales Gas ist, eine Annahme, die nicht sehr weit von der Wahrheit abweicht). Seine Molarrefraktion ist also gleich

$$\frac{1{,}00119^2 - 1}{1{,}00119^2 + 2} \cdot 23{,}9 . 10^3 = 19{,}0$$

Pro Gramm ist die „spezifische Refraktion" oder Grammrefraktion definitionsgemäß

$$B_1 = \frac{19{,}0}{74{,}0} = 0{,}256$$

Flüssiges Methylacetat hat den Brechungsexponent 1,363, also ist seine Grammrefraktion, da das Volum von 1 g gleich $\frac{1}{0{,}904}$ ist (s. Tabelle),

$$B_2 = \frac{1{,}363^2 - 1}{1{,}363^2 + 2} \cdot \frac{1}{0{,}904} = 0{,}245$$

Ebendeshalb stimmen auch die in den obenstehenden und in der folgenden Tabelle angegebenen Molarrefraktionen von Dampf und Flüssigkeit mit den aus den Atomrefraktionen berechneten.

Es darf auch nicht außer Betracht gelassen werden, daß die Formel (10) nicht die einzige ist, welche die Tatsachen annähernd darzustellen vermag. Praktisch in jeder Hinsicht ihr mindestens gleichwertig, in einem hier nicht zu erörternden Falle sogar entschieden überlegen ist die Landolt-Gladstonesche, rein empirische Formel

$$\frac{n-1}{d} = L = \text{const.} \ldots\ldots \quad (11)$$

wo n und d dieselbe Bedeutung haben wie bisher. Folgende den früheren ganz analog zu verstehende Tabellen zeigen dies. Die erste gilt für Gase, die anderen bedürfen keiner Erläuterung (vgl. Tabelle S. 1041).

Das Molargewicht eines Stoffes läßt sich also aus Brechungsvermögen und Dichte des gasförmigen sowohl wie des flüssigen Zustandes auf Grund der Formel (10) oder (11) meist mit großer Genauigkeit berechnen. Die Ausnahmen vom genauen additiven Schema sind jedoch vorhanden und machen darum die Hinzuziehung anderer Relationen nötig.

8d) Andere Regeln. Außer den bisher behandelten Beziehungen existieren noch viele andere, auf die sich Molargewichtsberechnungen und -schätzungen begründen lassen. Sie kommen praktisch selten in Betracht und sollen daher hier nicht ausführlich besprochen werden. Zu ihnen gehört die Analogie des chemischen Verhaltens, bezüglich gewisser der qualitativen und quantitativen Zusammensetzung nach mög-

Gas	Formel	A′
Wasserstoff	H_2	3,35
Sauerstoff	O_2	6,50
Stickstoff	N_2	7,11
Kohlenoxyd	CO	8,00
Kohlendioxyd	CO_2	10,82
Schwefelwasserstoff . . .	H_2S	14,9
Stickoxydul	N_2O	13,4
Stickoxyd	NO	7,12
Schwefeldioxyd	SO_2	16,45
Chlor	Cl_2	18,6
Brom	Br_2	27,1
Ammoniak.	NH_3	8,92
Chlorwasserstoff	HCl	10,7
Bromwasserstoff	HBr	13,8
Cyan	$(CN)_2$	19,7
Cyanwasserstoff	HCN	10,5
Quecksilber	Hg	13,2
Chlorkohlenstoff	CCl_4	43,6
Chloroform	$CHCl_3$	35,2
Methan	CH_4	10,6
Aethylen	C_2H_4	17,3
Methylchlorid	CH_3Cl	20,8
Phosphor	P_4	32,9
Schwefel	S_3	27,0
Phosphortrichlorid	PCl_3	41,8

Daraus folgt

Kohlenstoff		Schwefel	
aus	A	aus	A
CO	4,7	H_2S	11,5
CO_2	4,3	SO_2	10,0
$(CN)_2$	6,3		
HCN	5,7		
CCl_4	6,4		
$CHCl_3$	5,6		
CH_4	3,9		
C_2H_4	5,3		
CH_3Cl	6,5		

Die Atomrefraktionen sind nunmehr

	A′
H	1,68
O	3,25
N	3,56
C	4,3
Cl	9,2

Hieraus erhält man für die Verbindungen bei Dampf und Flüssigkeit nach den Daten der früheren Tabellen folgende Reihen

	$L_{ber.}$	L_{dampf}	$L_{flüss.}$
Acetaldehyd	18,6	19,4	18,8
Aceton	26,2	26,5	26,5
Aethylacetat . . .	37,1	33,8	36,4
Aethyläther	37,3	37,0	35,0
Aethylalkohol . . .	22,0	21,1	20,7
Allylchlorid	31,3	34,6	33,9
Amylen	38,3	40,5	40,7
Benzol	35,3	43,7	44,4
Methylacetat	29,4	28,5	29,8
Methylalkohol . . .	14,3	13,1	12,8
Pentan	41,6	41,0	40,0

	$L_{ber.}$	L_{dampf}	$L_{flüss.}$
Wasser	6,60	6,20	6,00
Brom	—	27,1	32,3
Phosphor (P_4) . . .	—	32,9	74,5
Schwefel (P_3). . . .	—	27,0	34,0
Phosphortrichlorid .	—	41,8	45,4
Schwefeldioxyd . .	—	16,4	13,5

licher Reaktionen, ferner das magnetische Verhalten (vgl. den Artikel „Magnetooptik“) und besonders die Farbe im weiteren Sinne, d. h. die Fähigkeit zur Emission und Absorption des Lichtes (vgl. die Artikel „Spektroskopie“, „Absorption“ und „Farbe“). Die Analogie im Bau von Spektren hat enge Beziehungen zur chemischen Analogie, wie sich insbesondere bei den Funkenspektren der Elemente gezeigt hat. Daraus erwächst die Möglichkeit, bei einer Verbindung unbekannter Formel, aber qualitativ und prozentual bekannter Zusammensetzung, die Entscheidung über die Formel auf Grund spektraler Analogie der Verbindung oder ihres Metalles zu anderen Elementen zu fällen.

Ferner gehören hierher die Vernonsche Regel der abnormen Siedepunkte (vgl. den Artikel „Flüssigkeiten“), die Volumverhältnisse beim kritischen Punkte (vgl. den Artikel „Aggregatzustände Kritische Erscheinungen“) und beim absoluten Nullpunkte (vgl. den Artikel „Thermometrie“), gewisse Regeln der Zähigkeit (Artikel „Flüssigkeitsbewegung“), des dielektrischen Verhaltens (Artikel „Dielektrizität“, die nur sehr roh zutreffende Raoultsche Regel der molaren Schmelzpunktserniedrigungen, die dahin lautet, daß die Depressionskonstante E, dividiert durch das Molargewicht des Lösungsmittels, eine universelle Konstante sei, u. a. m.

9. Vergleich der Ergebnisse verschiedener Methoden. Die vielen bisher mehr oder weniger ausführlich besprochenen Methoden der Molargewichtsermittelung sind nur zum Teile hinreichend fest begründet, um für sich allein eine Entscheidung herbeiführen zu können. Dies gilt eigentlich nur von den auf dem Avogadroschen Prinzip beruhenden, also denen, die auf verdünnte Gase und verdünnte Lösungen anwendbar sind, und auch für diese nur dann, wenn die Objekte nachweislich der Definition der idealen Verdünnung entsprechen. Dagegen bedürfen die Ergebnisse aller anderen Methoden, da diesen entweder nur halbquantitativ geltende oder nur qualitative Erfahrungssätze zugrunde liegen, der gegenseitigen Bestätigung; dahin gehören die Kriterien der Isomorphie, des Molarvolumens, der Molarwärme, der Troutonschen Regel, des

Brechungsvermögens, der Eötvös-Ramsayschen Regel.

Ob nun solche Uebereinstimmung vorhanden ist, wollen wir an Beispielen prüfen.

Es sei die Frage, welche Formel dem festen Magnesiumsulfat zuzuschreiben sei, das auf 96,0 g SO_4 24,4 g Mg enthält. Die Aehnlichkeit des chemischen Verhaltens weist auf die Beziehung zu Zinksulfat und zu Calciumsulfat hin (z. B. Fällung eines weißen unschmelzbaren Oxyds durch Alkalien, eines nicht sehr beständigen Carbonats durch Alkalicarbonate usw.) Ferner hat das Salz im Kristallzustande auf diese 96,0 g SO_4 einen Kristallwassergehalt von 7 H_2O wie das Zinksulfat. Mit diesem ist es von gleicher Kristallform und isomorph mischbar, und zwar werden im Mischkristalle je 65,4 g Zink durch 24,4 g Magnesium vertreten. Wenn danach das Magnesiumsulfat dem Zinksulfat analog $MgSO_4$ zu schreiben, das Mg also als zweiwertig anzunehmen ist, so muß seine Molarwärme wie die von $ZnSO_4$ gleich 28 sein. Für dreiwertiges Magnesium, dem das Sulfat $Mg_2(SO_4)_3$ zuzuschreiben wäre, müßte die spezifische Wärme des Elements wie die des Sulfats eine andere Größe haben. Das Atomgewicht müßte dann 36,6 sein, dem würde eine Atomwärme von $36{,}6 . 0{,}25 = 9{,}2$ entsprechen, abweichend vom Dulong-Petitschen Gesetze; und die Molarwärme des Sulfates würde sich zu $2 . 9{,}2 + 3 . 22{,}0 = 84{,}4$ berechnen, während zwar gefunden wäre $0{,}224\,(2 . 36{,}6 + 3 . 96{,}0) = 81{,}0$, aber die Analogie zum Werte von $ZnSO_4$ verloren ginge.

Entsprechend hätte man das Chlorid dann $MgCl_3$ zu schreiben und eine Molarwärme von $(36{,}6 + 3 . 35{,}5) . 0{,}191 = 27{,}3$ anzunehmen, während sich $9{,}2 + 3 . 6{,}9 = 29{,}9$ berechnen würde und die verwandten Chloride von Zn und Ca 18,2 haben.

Als Beispiel eines flüssigen Stoffes diene Benzol, dessen Molargewicht nach der Formel $C_6H_6 = 78$ sein müßte. Seine Dampfdichte bei 90°, auf Luft bezogen, ist 2,73, demnach das Molargewicht des Dampfes $2{,}73 . 28{,}9 = 79{,}0$. Die Eötvös-Ramsaysche Regel ergibt bei 80°

$$\omega = 2{,}12 . 202 = 428$$

und da das spezifische Volum $v = 1{,}230$, die Oberflächenspannung $\gamma = 20{,}3$ ist, so wird

$$M = \frac{1}{1{,}230}\sqrt{\left(\frac{428}{20{,}3}\right)^3} = 78{,}6$$

Die Troutonsche Regel fordert

$$M = \frac{20{,}8 . 353}{93{,}2} = 78{,}8$$

Wie aus diesen Beispielen folgt, führen die verschiedenen Regeln zu gleichen Schlüssen. Ausnahmen sind vorhanden, wie in den einzelnen Abschnitten schon erwähnt wurde (vgl. Essigsäure S. 1023), aber sie bestehen dann nicht nur bezüglich einer einzelnen Regel, sondern bezüglich aller. Es geht daraus hervor, daß man zwei Gruppen von Stoffen zu unterscheiden hat, deren Grenzen natürlich nicht scharf sind, und die man als Gruppe normaler und als Gruppe abnormer Stoffe bezeichnen kann. Stoffe, die der ersten angehören, erlauben eine Berechnung der Molargewichte auf Grund der angegebenen Regeln, die anderen nicht ohne Modifikation dieser Regeln. Ob ein Stoff der einen oder der anderen Gruppe angehört, ist nicht a priori zu sagen; bei flüssigen Stoffen erhält man die bequemste und wohl schnellste Entscheidung durch die Eötvös-Ramsaysche Regel. Auch bei dem Zutreffen aller Regeln aber darf, wie schon mehrfach hervorgehoben wurde, bei festen und flüssigen Stoffen nie der Schluß gezogen werden, daß das berechnete Molargewicht das wahre Molargewicht sei und also bei Uebereinstimmung mit dem für das Gas gefundenen dem des Gases gleich sei, sondern nur, daß es sich zu dem des Gases verhalte, wie das für einen beliebigen anderen normalen Stoff berechnete zu dem des entsprechenden Gases. Mit anderen Worten: die Molargewichte normaler Stoffe im festen oder flüssigen Zustande brauchen denen der entsprechenden Gase nicht gleich zu sein, sondern zu ihnen nur in einem für verschiedene Stoffe nahezu gleichen Verhältnisse zu stehen.

10. Auffassung vom Standpunkte der Molekularhypothese. Die hier behandelten teils rein empirisch, teils auch theoretisch begründeten Tatsachen lassen sich anschaulich durch die eingangs erwähnte Molekularhypothese darstellen. Die Molekel ist hiernach aufzufassen als ein sehr kleines Teilchen eines Stoffes, das alle Eigenschaften der ganzen Masse entweder selbst hat, oder durch seine Beziehung zu den ihm benachbarten Teilchen hervorruft. Diese Beziehung kann, da sie räumlich getrennten Objekten zukommt, als Aeußerung von über den Raum wirkenden Kräften gedacht, also durch eine gesetzmäßige Anziehungs- oder Abstoßungserscheinung oder durch eine gegenseitige Bewegung der Molekeln gedeutet werden. Der Ausdruck dieser Möglichkeit ist die hochausgebildete kinetische Theorie (vgl. den Artikel „Kinetische Theorie der Materie").

Es bleibt dabei die Frage offen, ob eine solche Anziehung zwischen absolut scharf begrenzten Teilchen durch den leeren Raum hin stattfindet, oder ob die Molekeln als Körper aufzufassen sind, die von innen nach außen immer weniger dicht werden und gegen außen schließlich in eine dünne Hülle ver-

laufen, die in die der Nachbarmolekeln übergeht (Molekeln mit Aetherhülle). Die Entscheidung dieser Frage kommt weniger für chemische als für physikalische Vorstellungen (Theorie des Lichtes, der Elektrizität, des Magnetismus) in Betracht, und wir können hier ohne sie auskommen und der Einfachheit wegen die Molekeln als starre getrennte Körper auffassen. Dann erklären sich die einzelnen hier besprochenen Tatsachen, Regeln und Gesetze folgendermaßen.

1. Volumgesetz der Gase (siehe S. 1019). Bei Gleichheit von Temperatur und Druck enthalten gleichgroße Volumina verschiedener Gase gleichviel Molekeln. Die Molekeln der Elemente können aus einem Atom oder aus mehreren Atomen bestehen (Quecksilber Hg, Sauerstoff O_2). Die Gewichte der einzelnen Molekeln verhalten sich also wie die Gewichte solcher Volumina, und da diese gleich den Molargewichten sind (gleich den oben angegebenen Molargewichten, wenn als Norm Sauerstoff $O_2 = 32$ gewählt ist), so muß die oben definierte gleiche Zahl immer gleich dem Verhältnisse des Molargewichts zum Molekulargewichte sein. Man drückt sie aus entweder durch die Anzahl der Molekeln in 1 ccm bei 0^0 unter 760 mm Hg — dann heißt sie die Loschmidtsche Zahl —, oder besser als Zahl der Molekeln pro Mol; da ein Mol eines idealen Gases unter diesen Umständen 22412 ccm einnimmt, so ist diese Zahl der Molekeln pro Mol gleich der Loschmidtschen Zahl mal 22412. Dieses Produkt wird auf Grund von Ueberlegungen, über die Näheres unter „Kinetische Theorie der Materie" nachzusehen ist, gleich rund 70.10^{22} gesetzt.

Bei normaler Dampfdichte sind die Molekeln unabhängig voneinander beweglich und üben durch diese Bewegung auf die Gefäßwände einen Druck aus, den man direkt messen kann. Abnorme Dampfdichte ist die Folge von Hinzutreten gegenseitiger Beeinflussung — Attraktion — der Molekeln; dadurch wird eine Verminderung des Druckes verursacht. Als Korrektionsgröße, die bei verdünnten Gasen sehr klein, bei konzentrierten Gasen und bei flüssigen und festen Stoffen sehr groß ist, tritt das Eigenvolum der Molekeln auf, das von dem totalen scheinbar erfüllten Raume abzuziehen ist.

2. In verdünnter Lösung verhalten sich die Molekeln wie Molekeln verdünnter Gase. Verdünnt heißt die Lösung so lange, als die gegenseitige Attraktion der Molekeln des gelösten Stoffes und des Lösungsmittels, infolge großen Ueberschusses des letzteren, eine praktisch konstante Größe ist und sich demnach in den Konstanten der einzelnen Gesetze verbirgt. Daraus folgen die Gesetze des osmotischen Druckes (Abschnitt 4, S. 1024; vgl. auch den Artikel „Osmotische Theorie").

Zu große Molargewichte erklären sich hier wie bei Gasen durch die Attraktion der gelösten Molekeln und die bei nicht idealer Verdünnung hier neu hinzutretende mit der Konzentration veränderliche Attraktion der gelösten Molekeln zu denen des Lösungsmittels.

3. Die Molekeln der reinen flüssigen Stoffe sind entweder denen der entsprechenden idealen Gase gleich oder Vielfache davon. Soweit die Stoffe normal sind (s. o.), ist für den zweiten Fall das Verhältnis der beiden Molekelarten als für alle der gleichen Regel gehorchenden Stoffe gleich anzunehmen. Die von der Regel abweichenden Stoffe haben im Flüssigkeitszustande größere Molekeln als im Dampfzustande (Polymerie, siehe den Artikel „Isomerie").

Völlig analog lautet der Schluß für feste Stoffe, mit dem Zusatze, daß auch fester und flüssiger Stoff nicht gleiche Molekeln zu haben brauchen. Es tritt hier (und bei den weichen liquokristallinen Substanzen, vgl. den Artikel „Kristalle, Flüssige Kristalle") noch die Möglichkeit von Verschiedenheiten der Richtungseigenschaften (Lichtbrechung, Leitfähigkeit für Wärme und Elektrizität usw.) je nach der Kristallachse (vgl. den Artikel „Kristallographie") hinzu. Diese erklärt sich entweder durch von Stoff zu Stoff verschiedene Form der Molekeln oder durch verschiedene Anordnung der Molekeln in verschiedenen Richtungen. Die Isomorphie beruht auf der Analogie der Molekelform oder der Molekelanordnung.

Feste Lösungen sind ebenso aufzufassen wie flüssige.

Die spezifische Wärme der Elemente und Verbindungen ist der Ausdruck einer Veränderung der molekularen Struktur, die eine Wärmezufuhr erfordert. Diese Veränderungen sind bei festen Stoffen meist, bei flüssigen dagegen nur in einzelnen Gruppen von analoger Art und Größe. Die Verdampfungswärme jeder Molekel ist die zur Ueberführung aus dem Flüssigkeitszustande in den des Dampfes nötige Arbeit. Sie besteht in der Ueberwindung der starken Attraktion der Flüssigkeitsmolekeln, oder, falls angenommen wird, daß die Flüssigkeitsmolekeln Multipla der Gasmolekeln sind, in der Zerlegung dieser komplexen Molekeln in einfache (der „Fluidonen" in „Gasonen"; J. Traube). Diese Arbeit ist bei vergleichbaren Temperaturen (vgl. den Artikel „Aggregatzustände, Kritische Erscheinungen"), speziell beim gewöhnlichen Siedepunkte, für normale Stoffe proportional dem Quotienten aus Tem-

peratur und Molekulargewicht, der Proportionalitätsfaktor ist gleich $20{,}8 : 70.10^{22} = 3.10^{-23}$. Abnorme Flüssigkeiten haben eine andere Größe der Attraktion oder der Komplexität der flüssigen Molekeln.

Die Lichtbrechung hängt bei allen Stoffen (außer bei Kristallen) fast nur von der Masse und von einer jedem Elemente charakteristischen Größe ab; sie ist also als eine wesentlich dem Atom zukommende Eigenschaft aufzufassen. Durch Zusammenlagerung der Atome zu Molekeln und der Molekeln zu komplexen Molekeln oder durch die Massenattraktion der Molekeln werden nur sekundäre Veränderungen hervorgerufen, die von Stoff zu Stoff verschieden sein können.

Literatur: *Zu* **3.** — **K. Windisch,** *Die Bestimmung des Molekulargewichtes, Berlin 1892 (hier besonders umfassende Zahlenangaben älteren Datums).* — **Müller, Pouillet, Pfaundler,** *Lehrbuch der Physik, 10. Aufl., Band III, Braunschweig 1907.* — **Ostwald—Luther,** *Hand- und Hilfsbuch zur Ausführung physikochemischer Messungen, 3. Aufl., Leipzig 1910.* — **F. Kohlrausch,** *Lehrbuch der praktischen Physik, 11. Aufl., Leipzig 1910.* — *Zu* **4.** — *Theoretisches:* **J. H. van't Hoff,** *Vorlesungen über theoretische und physikalische Chemie, Braunschweig 1898—1900.* — **W. Ostwald,** *Lehrbuch der allgemeinen Chemie, Leipzig 1893—1905.* — **W. Nernst,** *Theoretische Chemie, 6. Aufl., Stuttgart 1909.* — *Praktisches:* **Ostwald—Luther,** *Hand- und Hilfsbuch zur Ausführung physikochemischer Messungen, Leipzig 1910.* — *Außer diesen Büchern noch:* **Lothar Meyer,** *Moderne Theorieen der Chemie, Breslau 1883.* — **Derselbe,** *Grundzüge der theoretischen Chemie, Leipzig 1893.* — **S. Smiles,** *Relations between chemical constitution and physical properties, London 1910.* — **S. Young,** *Stoichiometry, London 1908.* — **J. H. van't Hoff,** *Ansichten über die organische Chemie, Braunschweig 1878.*

K. Drucker.

Molluscoidea.

H. Milne Edwards vereinigte 1841 Bryozoen und Tunicaten zu einer besonderen Abteilung unter dem Namen Tuniciers und gab dieser Gruppe 1843 den Namen Molluscoides.

Der Gedanke, diese beiden Abteilungen zu vereinigen, findet sich bei Milne Edwards schon 1837.

Nachdem dann Hancock die Aehnlichkeiten im Bau der Brachiopoden und Bryozoen betont hatte, erklärte Huxley 1853 daß, falls diese Beziehungen sich bestätigten, die Brachiopoden in die von Milne Edwards aufgestellte Gruppe der „Molluscoides“ einzureihen seien, führte das 1855 auch durch und unterschied dann unter „Molluscoidea“: 1. Brachiopoden und Bryozoen; 2. Tunicaten.

Nachdem dann die engeren Beziehungen der Tunicaten zu den Vertebraten erkannt waren, faßte Claus 1876 die Tunicaten als besonderen selbständigen Typus auf und sprach sich dafür aus, daß Brachiopoden und Bryozoen als Molluscoidea zwischen Würmer und Mollusken zu stellen seien. Das hat er dann auch 1882 getan, wobei den Bryozoen (Ecto- und Entoprocta) auch die Pterobranchia zugerechnet werden.

Weiterhin wurden von Hatschek 1888 die genannten Gruppen mit Hinzufügung der Phoroniden (im Anschluß an ähnliche Gruppierungen von Caldwell und Ray Lankester) als Tentaculata (= Molluscoidea) zusammengefaßt. Für dieselben Formen einschließlich der Sipunculiden u. a. braucht Lang 1888 den Namen Prosopygia.

Ebenso wie Hatschek umgrenzen Korschelt und Heider die Molluscoidea; auch Grobben in der Neubearbeitung des Clausschen Lehrbuches. Bütschli 1910 vermeidet den Ausdruck Molluscoidea und hat auch wieder eine etwas andere Gruppierung angenommen.

Aus dem Gesagten geht zur Genüge hervor, daß die verwandtschaftlichen Beziehungen der in Betracht kommenden Gruppen noch keineswegs als gesichert gelten können. So ist auch verständlich, daß manche Autoren den Begriff Molluscoidea überhaupt nicht mehr gebrauchen.

Literatur. **O. Bütschli,** *Vorlesungen über vergleichende Anatomie. Leipzig 1910.* — **C. Claus,** *Grundzüge der Zoologie 3. Aufl. 1876. S. 821; 4. Aufl., Bd. 2, 1882, S. 89.* — **H. Milne Edwards,** *Classification naturelle des Polypes. L'Institut V., N. 212, 1837, S. 178/179.* — **Derselbe,** *La Zoologie. In „Cours élémentaire d'histoire naturelle etc.“ Paris 1841, S. 536.* — **Derselbe,** *Eléments de Zoologie 2. éd. Paris 1843, S. 238 und 312 [hier, auf S. 238 wird der Ausdruck „Molluscoides“ zum ersten Male gebraucht wie M. Edwards selbst in einer brieflichen Mitteilung an Harmer (1901, S. 475 Anm.) erklärt hat].* — **S. F. Harmer,** *Polyzoa. In the Cambridge Natural History Bd. 2. London 1901, S. 475.* — **B. Hatschek,** *Lehrbuch der Zoologie. Jena 1888, 1. bis 3. Liefg.* — **Th. H. Huxley,** *On the Morphology of the Cephalous Mollusca usw. Philos. Transactions R. Soc. London 1853, Bd. 143, S. 62.* — **Derselbe,** *Mollusca. In „The English Cyclopaedia of Natural History“ Bd. 3. London 1855, Spalte 858 ff.* — **E. Korschelt und K. Heider,** *Lehrbuch der vergleichenden Entwicklungsgeschichte der wirbellosen Tiere. Jena 1893 S. 1250 ff.* — **A. Lang,** *Lehrbuch der vergleichenden Anatomie der wirbellosen Tiere. Jena 1894 ff.*

F. Blochmann.

Mollusca.

1. Der Tierkreis der Mollusca. 2. Morphologie. a) Kalkschale. b) Integument. c) Fuß. d) Muskulatur. e) Kopf. f) Symmetrische und asymmetrische Form. g) Atmungsorgane. h) Nervensystem. i) Sinnesorgane. k) Leuchtorgane. l) Darm. m) Herz und Gefäßsystem. n) Keimdrüsen. 3. Entwickelung und Verbreitung. 4. Systematik.

1. Der Tierkreis der Mollusca. Der Tierkreis der Mollusken, Weich- oder Schaltiere, schließt sich an den der Würmer an; zwischen beiden vermitteln die Solenogastren (Fig. 1), die meist zu den Mollusken gestellt werden, obwohl sie in den meisten Organen mehr Aehnlichkeit mit Würmern zeigen. Den Solenogastren schließen sich die Placophoren an und werden mit ihnen unter dem Namen Amphineuren zusammengestellt; auch sie weisen den übrigen Mollusken gegenüber noch beträchtliche Unterschiede auf; daher hat man sie als Aculiferen, die anderen als Conchiferen bezeichnet. Die Kopffüßer stellen den höchstentwickelten Typus der Mollusken dar.

2. Morphologie. Die einzelnen Organe verändern sich in der langen Formenreihe der Mollusken mehr oder weniger weitgehend. Im allgemeinen kann man diese als gedrungene Tiere ohne Segmentierung und in der Regel ohne inneres Skelett bezeichnen, die in der Regel dauernd oder nur während der Entwickelung eine äußere Kalkschale und einen bauchständigen muskulösen Fuß besitzen; ihr Nervensystem ist durch eine Visceralkommissur charakterisiert; die Mundhöhle pflegt eine von einer chitinösen Raspel bedeckte Zunge zu enthalten, in den Magen mündet eine Verdauungsdrüse; das Herz liegt in einem Beutel, der durch 2 Nieren, von denen eine sich rückbilden kann, mit der Außenwelt in Verbindung steht.

2a. Die Kalkschale. Die Kalkschale besteht bei Placophoren aus 8 hintereinander gelegenen Platten (Fig. 3), bei den Bivalven aus 2 seitlichen Klappen, sonst ist sie einheitlich (Fig. 2), bei Solenogastren und sehr wenigen Nacktschnecken fehlt sie auch während der Entwickelung völlig, während sie in der Regel vorübergehend auftritt, wenn sie bei den erwachsenen Tieren rückgebildet ist, das ist bei zahlreichen Schnecken und Kopffüßern (Fig. 4) der Fall.

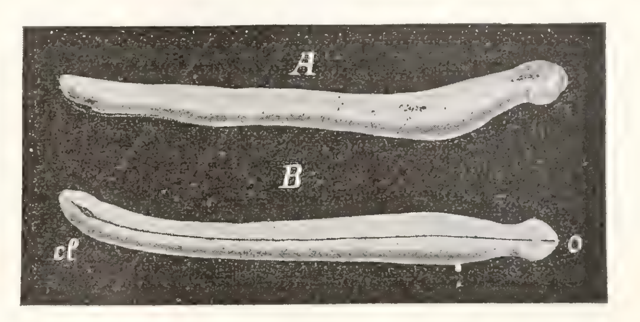


Fig. 1. Solenogastren.

Die Schale liegt bei Placophoren dem Körper in ihrer ganzen Ausdehnung an, bei den Conchiferen hat sich unter ihrem Rand eine Hautfalte, der Mantel, ausgebildet, die besonders bei den Muscheln eine bedeutende Breite erlangt. Abbildungen, die die hier von der äußeren und inneren Organisation der Mollusken gegebene kurze Darstellung erläutern, finden sich in den Artikeln „Amphineura", „Cephalopoda", „Gastropoda", „Lamellibranchiata" und „Scaphopoda".

Die Molluskenschale besteht in der Regel

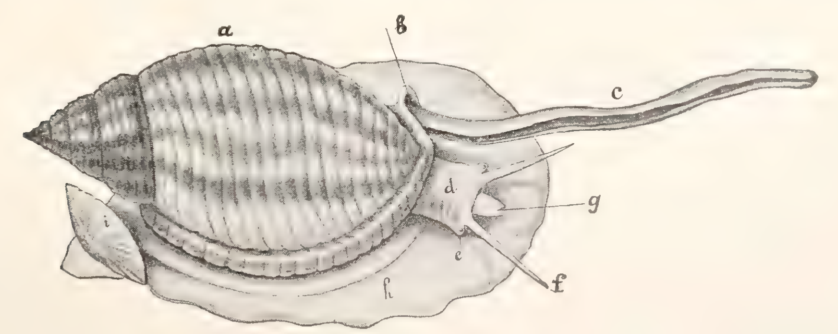


Fig. 2. Cassis sulcosa. Nach Poli. a Schale, b Schnabel, c Sipho, d Kopf, e Auge, f Tentakel, g Rüssel, h Fuß, i Deckel.

aus einer äußeren Schicht (Ostracum), die am Rande weiterwächst, ohne weiterhin in der Stärke zuzunehmen, und einer inneren Schicht (Hypostracum), die hauptsächlich dem Dickenwachstum dient und an der allein die Muskulatur sich anheftet; außen ist die Kalksubstanz von einer mehr oder weniger starken chitinösen Haut (Periostracum) überzogen. Die äußere Schicht des Ostracum zeigt häufig eine von der inneren Schicht verschiedene Struktur, bei den Unioniden z. B. ist jene prismenartig, diese perlmutterartig

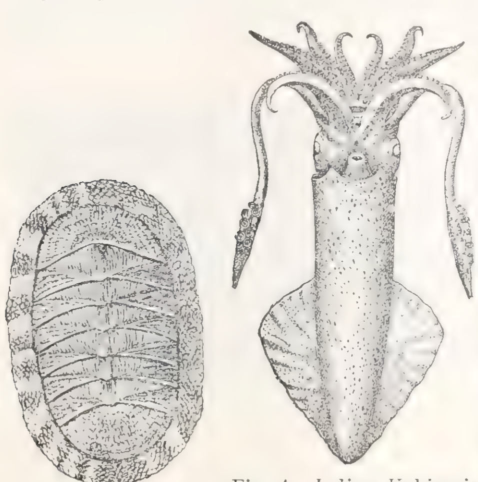


Fig. 3. Kalkschale bei Placophoren.

Fig. 4. Loligo Kobiensis (nach Hoyle), von der Bauchseite betrachtet.

gebaut, und nur jene pflegt die bunten Farben der Oberfläche aufzuweisen, die die Schale vieler Arten charakterisieren. Die Schale der Placophoren wird von Fortsätzen des darunterliegenden Epithels durchzogen, die vermutlich irgendeiner Sinneswahrnehmung dienen; dagegen ist die Schale der Conchiferen undurchbohrt, nur bei einer Süßwassermuschel, S p h a e r i u m l a c u s t r e , sind zarte Epithelfortsätze in Kanälen der Schale nachgewiesen worden, so daß hier ganz vereinzelt ein ähnliches Verhalten wie bei vielen Brachiopoden vorkommt.

Die Molluskenschale zeigt häufig eine Spiralform, und zwar liegen die Windungen bald in einer Ebene, bald erheben sie sich schraubenartig, während sie sich mehr oder weniger schnell und gleichmäßig erweitern. Solche Spiralschalen sind ja hauptsächlich für die meisten Schnecken charakteristisch, aber auch Kopffüßer (N a u t i l u s, S p i r u l a) und einige Muscheln (z. B. I s o c a r d i a) besitzen solche.

Da die Schale den stärkeren Muskeln zur Anheftung dient, kann man sie als äußeres Skelett ansehen. Im Innern des Körpers kommen zuweilen knorpelähnliche Bildungen vor, am verbreitetsten ein oder mehrere Paare in der Zunge, am stärksten entwickelt bei Kopffüßern; einige Schnecken, deren Schale rückgebildet ist, haben zur Stütze ein System von Kalkkörpern in der Haut ausgebildet.

2b. I n t e g u m e n t. Eine Cuticula mit Kalkstacheln oder Schuppen bedeckt den Körper der Solenogastren und den Rand der Placophoren; sonst wird die Oberfläche von einem meist mit Drüsenzellen ausgestattetem Epithel bekleidet, das häufig flimmert.

Die H a u t d r ü s e n spielen im Leben der Mollusken eine wichtige Rolle. Ihr Sekret ist entweder schlüpfrig oder es erstarrt allmählich. Für das Kriechen hauptsächlich bei Landschnecken ist eine am Vorderrande des Fußes gelegene Schleimdrüse unentbehrlich, deren Absonderung gewissermaßen einen weichen Teppich bildet und die Sohle vor Verletzungen durch Unebenheiten des Bodens bewahrt. In der Fußsohle findet sich häufig eine andere Drüse, mit deren Hilfe die Janthinen aus Luftbläschen ihr Floß bauen und sich daran befestigen, um an der Oberfläche des Wassers zu schwimmen, während dieselbe Drüse vieler Muscheln den Byssus erzeugt, mit dem diese sich am Boden festheften. Auch im Mantelraum kommen haufig Drüsen vor, die bei manchen Schnecken den Purpur absondern.

2c. D e r F u ß. Der Fuß, der ursprünglich eine flache Kriechsohle darstellt, kann recht verschiedene Formen und Aufgaben annehmen. Er bildet sich zur Flosse der Heteropoden und zu den Flügeln der Pteropoden, sowie zum Trichter der Cephalopoden um und dient alsdann zum Schwimmen, die meisten Bivalven und die Scaphopoden benutzen ihn zum Eingraben, zahlreiche Zweischaler zur Anheftung vermittels des Byssus, einer Drüsenabsonderung. In wenigen Fällen bei Schnecken und Muscheln bildet er sich völlig zurück.

2d. D i e M u s k u l a t u r. Die Muskulatur ist mit Ausnahme der Solenogastren durch die Anheftung der stärkeren Züge an der Schale gekennzeichnet, der regelmäßige Hautmuskelschlauch ist zum größten Teil rückgebildet und auch bei schalenlosen Formen verhält sich die Leibeswand wesentlich anders als bei Würmern. Der Fuß pflegt als Organ der Ortsbewegung die stärkste Muskelmasse darzustellen, dazu kommen bei Placophoren die Verbindungsmuskeln der Schalenstücke und die z. T. sehr kräftige Muskulatur des Körperrandes, bei Bivalven die Schließmuskeln der Schale und zuweilen die Muskeln der Siphonen.

2e. D e r K o p f. Ein Kopf ist in verschiedener Weise entwickelt. Die Placophoren haben nur eine kurze schnauzenartige Erhebung der Mundgegend mit einem schmalen hufeisenförmigen Fältchen am Vorderrande,

bei den Schnecken pflegt der Kopf Augen und ein oder zwei Paare von Fühlern zu tragen, während sich an ihm bei den Cephalopoden die meist mit Saugnäpfen besetzten Arme ausgebildet haben. Die Bivalven haben keinen Kopf.

2f. Symmetrie. Die ursprüngliche Symmetrie der beiden Körperhälften ist zuweilen bei Bivalven verloren gegangen, am auffallendsten ist sie indessen bei den meisten Schnecken gestört infolge einer Drehung der oberen Körperhälfte gegen die untere, wodurch die Schalenmündung, der Enddarm, die Kiemen, die Nieren und die Visceralkommissur von hinten nach vorn verlagert werden, außerdem ist auch die Spiralschale in der Regel asymmetrisch. In einigen Organen, besonders der Keimdrüse und ihren Gängen, kann auch sonst Asymmetrie ausgedrückt sein.

Zur Erklärung dieser sehr merkwürdigen Drehung sind verschiedene Theorien aufgestellt worden. Vermutlich hat sich die Spiralschale ursprünglich in der Lage ausgebildet, daß ihre Oeffnung nach hinten gerichtet war, dabei kippte sie indessen nach links über und durch die Reibung auf dem Boden während des Kriechens wurde sie so herumgedreht, daß sie mit den an ihr befestigten Körperteilen am Ende die entgegengesetzte Lage annahm, in der sie weitergeschleppt werden konnte, ohne fortwährend überzukippen.

2g. Atmung. Zur Atmung dienen in der Regel Kiemen, doch können sich diese auch bei Wasserbewohnern zuweilen rückbilden; in diesem Fall und mehr oder weniger auch neben den Kiemen übernimmt die untere Oberfläche des Mantels eine respiratorische Aufgabe, und sie behält diese auch bei den Schnecken, die das Wasser verlassen, so daß sie bei diesen der Luftatmung dient.

Die Kiemen pflegen in der Aftergegend zu liegen, bei Solenogastren sogar, wenn solche überhaupt ausgebildet sind, in der erweiterten Analhöhle. Die Placophoren besitzen stets mehrere doppelfiedrige Kiemen neben dem Fuße, ihre Zahl ist sehr verschieden. Dagegen haben die Conchiferen ursprünglich jederseits eine solche Kieme (Ctenidium). Diese Kiemen erfahren verschiedene Umbildungen; bei Kopffüßern pflegen sie sich in ziemlich primitiver Form zu erhalten und sind nur bei Nautilus verdoppelt. Bei Zweischalern verlängern sich meistens ihre Blättchen zu Fäden, die untereinander verwachsen und breite durchbrochene Blätter bilden. Am verschiedensten verhalten sich die Kiemen der meisten Schnecken. Nur die ältesten besitzen ihrer 2, meistens erhält sich nur die eine und verwächst unter Rückbildung der oberen Blattreihe mit dem Mantel. Nicht selten findet sich nur ein vom Mantel entspringendes, aber häufig stark gefaltetes Blatt. Zuweilen haben sich anstatt der ursprünglichen Kiemen neue entwickelt, Fortsätze an der Unterseite des Mantels, bald an ähnlicher Stelle wie jene, bald an anderen Orten.

2h. Nervensystem. Das Nervensystem der Solenogastren und Placophoren zeigt noch ähnliche Merkmale wie bei den Würmern, 2 mittlere und 2 seitliche Längsstämme, die unter einander durch quere Kommissuren verbunden sind. Dazu kommt bei den ursprünglichsten Schnecken ein Nervenstrang, der hauptsächlich die beiden Kiemen und die darüber liegenden Mantelklappen versorgt, die „Visceralkommissur", die alle Conchiferen besitzen. Die Längsstämme im Fuße verkürzen sich und nehmen meist die Form einfacher Ganglienknoten an. Der vorderste Teil des Nervensystems ist ein Ring um den Schlund oder ein Paar Cerebralganglien, die neben oder vor dem Schlunde gelegen sind. Der vordere Teil der Verdauungsorgane nebst der Zungenmuskulatur wird in der Regel von einem Paar Buccalganglien versorgt.

2i. Sinnesorgane. Von Sinnesorganen haben die Statocysten bei den Conchiferen allgemeine Verbreitung; sie enthalten entweder einige kleine Kalkkörper oder einen größeren. Nur bei wenigen ursprünglichen Muscheln stehen sie durch ein Rohr mit dem Meerwasser in bleibendem Zusammenhang und enthalten Sandkörnchen. Augen finden sich am Kopfe der Schnecken und Kopffüßer, ursprünglich in sehr primitiver Ausbildung als offene Gruben, doch entwickeln sie sich besonders bei den letzteren zu bedeutender Höhe. Dagegen bilden sich die Kopfaugen mancher Schnecken und der Muscheln zurück und fehlen den Amphineuren und den Scaphopoden. Einige Zweischaler haben am Rande ihres Mantels augenartige Organe und eine Gruppe von Nacktschnecken auf ihrem Rükken; diese Organe haben wie die Wirbeltieraugen vom Licht abgewendete Stäbchen der Netzhaut im Gegensatz zu den Kopfaugen von Mollusken.

In 2 Gruppen von Placophoren haben sich in den Epithelfortsätzen, die die Schale durchziehen, augenartige Organe entwickelt.

Epitheliale Sinnesorgane, die verschiedene Aufgaben erfüllen dürften, finden sich an sehr verschiedenen Stellen. Tastorgane in Form von fadenförmigen Fortsätzen kommen hauptsächlich am Kopf der Schnecken und am „Epipodium", einer Hautfalte, die zuweilen zwischen Fuß und Mantel gelegen ist, sowie am Mantelrande von Muscheln vor; dazu mögen auch die Fäden in der vorderen Grube von Solenogastren gehören. Als Geruchsorgane wurden gedeutet die „Osphradien" der meisten Conchiferen, die in naher Beziehung zu den Kiemen stehen, und die

„Rhinophoren“ am Kopf einiger Schnecken, sowie ein paar Grübchen am Kopfe von Cephalopoden; als Geschmacksorgan hauptsächlich ein Epithelialwulst, der unter der Zunge von Placophoren und Scaphopoden vorhanden ist. Die Funktion einiger anderer epithelialer Sinnesorgane, die an verschiedenen Stellen der Oberfläche von Mollusken beobachtet wurden, ist ganz unsicher.

2k. Leuchtorgane. Leuchtorgane kommen hauptsächlich bei Cephalopoden vor, die in der Tiefsee leben.

2l. Mundöffnung. Die Mundöffnung pflegt am Ende einer kurzen oder bei vielen Schnecken verlängerten Schnauze gelegen zu sein, bei Solenogastren meistens sich einer mit Tastfäden ausgestatteten Höhlung anzuschließen, während sie bei Muscheln zwischen 2 sich an den Seiten mehr oder weniger verbreiternden Lippen liegt. Der vordere Teil des Darmrohrs ist bei einigen Solenogastren und vielen Schnecken vorstülpbar. Die meisten Mollusken besitzen eine Mundhöhle mit einer muskulösen Zunge, die von einer chitinösen Membran mit meist hakenförmigen Zähnchen (Radula) bedeckt ist. Das Hinterende dieser Reibfläche steckt in einem Blindsack und wächst hier fortgesetzt an, während sie vorn abgenutzt wird. Einigen Solenogastren und Schnecken, sowie allen Zweischalern fehlt eine Radula; wo sie vorkommt, spielt sie in der Systematik eine sehr wichtige Rolle, besonders bei Schnecken.

Der Radula gegenüber liegt bei Schnecken häufig eine Platte, die als Kiefer bezeichnet wird, obwohl sie nur selten einen schneidenden Rand hat, sie dürfte hauptsächlich zum Schutz des Epithels vor Verletzung durch die Radulazähne dienen. Bei Kopffüßern kommen richtige, wie ein Vogelschnabel wirkende, stark verhornte Kiefer vor.

In die Mundhöhle münden bei Schnecken und Kopffüßern meistens Drüsen, die als Speicheldrüsen bezeichnet werden; es findet sich ein Paar, nicht selten noch ein zweites Paar solcher Drüsen. Ihre Abscheidung ist zuweilen giftig, bei einigen Schnecken enthält sie eine Säure.

Der Schlund pflegt mit einem Paar drüsiger Erweiterungen ausgestattet zu sein, während in den Magen eine meistens paarige Verdauungsdrüse einmündet. Der Darm bildet häufig einige Schlingen, ist aber zuweilen kurz. Der After hat meistens eine mediane Lage in der Nähe des hinteren Körperendes, zuweilen mehr nach vorn gerückt, bei Schnecken aber in der Regel asymmetrisch an der rechten Seite. Nur bei Solenogastren hat der Darm wesentlich verschiedene Form und verhält sich wie bei Würmern. Zuweilen mündet in den Enddarm eine Drüse, die als Tintenbeutel bei Kopffüßern am stärksten entwickelt ist.

2m. Herz. Das Herz pflegt aus einer Kammer und 2 seitlichen Vorkammern zu bestehen, die bei Nautilus verdoppelt sind, während sich bei Schnecken meistens die eine rückbildet; die Solenogastren haben nur eine hintere Vorkammer. Die Kammer wird bei der Mehrzahl der Muscheln und den ursprünglichsten Schnecken vom Darm durchsetzt. Das Gefäßsystem ist sehr verschieden entwickelt, bei Solenogastren noch fast ganz ohne feste Wandungen, bei den meisten Mollusken nur im arteriellen Teil, zu dem auch das Herz gehört, gut ausgebildet, bei Kopffüßern am höchsten stehend.

2n. Keimdrüsen. Die Keimdrüsen der Solenogastren hängen mit dem Herzbeutel zusammen und durch seine Ausführungsgänge, deren äußerer Teil eine Schalendrüse darstellt, gelangen die Keimstoffe nach außen. Hierin verhalten sich die echten Mollusken sehr verschieden, da schon bei Placophoren die Keimdrüse vom Herzbeutel getrennt ist und eigene Ausführungsgänge erhalten hat, während die Perikardialgänge zu Nieren geworden sind. Alle Conchiferen haben solche Nieren, von denen nur bei den meisten Schnecken die eine rückgebildet ist. Darin, daß bei den ursprünglichsten Schnecken die Keimdrüse in den äußeren Teil der einen Niere mündet, ist noch eine Andeutung des früheren Verhaltens gegeben; dagegen dürfte der Zusammenhang der mit dem Herzbeutel verbundenen Leibeshöhle mit der Keimdrüse der Kopffüßer eine sekundäre Erscheinung sein, da hier nicht bloß Nieren, sondern auch Geschlechtsgänge vorhanden sind. Die Keimdrüsen der Solenogastren und Muscheln sind paarig, die der meisten Placophoren unpaarig und symmetrisch, sicher aus 2 verwachsenen Hälften gebildet, dagegen scheint bei den übrigen Mollusken die eine Drüse rückgebildet zu sein. Mit Ausnahme der zwittrigen Solenogastren sind die Mollusken ursprünglich getrenntgeschlechtlich, doch tritt sekundär bei zahlreichen Schnecken und einigen Muscheln Zwittrigkeit auf.

Die Ausführungsgänge der Keimdrüsen sind bei Placophoren und Bivalven zwar zuweilen erweitert und drüsig, doch kurz und ohne Anhangsorgane; dagegen komplizieren sich diese Gänge bei Kopffüßern und Schnecken häufig in bedeutendem Maße und bei diesen kann zu der ursprünglichen Oeffnung eine 2., sogar zuweilen eine 3. hinzukommen.

Zur Begattung dient den Schnecken häufig ein an der rechten Seite, meist in der Nähe des Fühlers entwickeltes Kopulationsorgan; dieses ist sicher wiederholt in verschiedenen Gruppen entstanden, es ist bald ein äußerer Anhang, der häufig einziehbar ist, ohne inneren Zusammenhang mit dem Samengang, bald der vorstülpbare Endteil des letzteren.

Die Kopffüßer haben zuweilen einen Penis, daneben kommen merkwürdige Umbildungen eines Armes zum Zweck der Uebertragung von Spermatophoren in die Mantelhöhle des Weibchens vor.

3. Entwicklung und Verbreitung. In der Entwicklung der meisten Mollusken tritt eine Flimmerlarve auf, die mit der der Anneliden eine weitgehende Uebereinstimmung zeigt und daher wie diese als Trochophora bezeichnet wird; sie hat entweder nur einen Wimperkranz, der häufig am Rande einer zwei- oder mehrlappigen Falte liegt, oder 2 bis 3 solche. Wegen der starken Ausbildung des als Velum bezeichneten Wimperapparates nennt man die Larven der Mollusken und besonders die der Gastropoden auch Veligerlarven. Die Schale tritt in der Regel schon frühzeitig auf und fehlt außer bei Solenogastren nur höchst selten ganz. Bei sehr dotterreichen Eiern, hauptsächlich in den Gruppen der Landschnecken und der Kopffüßer, und bei Brutpflege fällt die Flimmerlarve fort.

Aus dem Meere, in dem alle Klassen der Mollusken ursprünglich leben, haben sich nur einige Gruppen von Schnecken und Muscheln in das Süßwasser begeben und wenige Gruppen von Schnecken auf das Land; immerhin ist die Zahl der Arten, die jetzt das Süßwasser und das Land bewohnen, sehr beträchtlich.

4. Systematik. Da die Brachiopoden von den Mollusken ausgeschlossen und die Heteropoden und Pteropoden zu den Schnecken gerechnet werden, aus denen sie hervorgegangen sind, teilt man gegenwärtig diesen Tierkreis in 5 Klassen:

1. Amphineuren, von denen es noch strittig ist, ob die Solenogastren hinzugerechnet werden sollen;
2. Lamellibranchiaten, Zweischaler oder Muscheln;
3. Scaphopoden;
4. Gastropoden, Schnecken;
5. Cephalopoden, Kopffüßer.

Literatur. ***Fischer,*** *Manuel de Conchyliologie Paris 1887.* — ***Lang,*** *Lehrbuch der vergleichenden Anatomie der wirbellosen Tiere, 2. Aufl. Mollusca bearb. von* ***Hescheler,*** *Jena 1900.* — ***Bronns,*** *Klassen und Ordnungen des Tierreichs. Bd. 3. Mollusca, bearb. von* ***Simroth,*** *Leipzig 1892ff. (bisher sind bearbeitet: Amphineura, Scaphopoda und ein Teil der Gastropoden).* — ***Tryon-Pilsbry,*** *Manual of Conchology structural and systematic. Philadelphia (bearbeitet sind die Gastropoden zum größten Teil, die Scaphopoden und die Amphineuren).* — *Außerdem sei auf die in den Artikeln „Amphineura", „Cephalopoda", „Gastropoda" und „Lamellibranchiata" angeführte Literatur verwiesen.*

J. Thiele.

Mond.

Siehe die Artikel „Selenologie" und „Kosmogenie".

Mond

Ludwig.

Geboren am 7. Mai 1839 zu Kassel, gestorben am 12. Dezember 1909 zu London, Schüler Kolbes und Bunsens, hat sich im Gebiete der chemischen Technik, zumal der Sodaindustrie, große Verdienste erworben durch Ausarbeitung eigener und Vervollkommnung älterer Methoden mit solchem Erfolge, daß er als Fürst der chemischen Industrie der Wissenschaft reichste Hilfsmittel für die Forschung zuführen konnte. Seine erste große Tat in dieser Richtung, der noch viele folgten, war die Gründung des Davy-Faraday-Laboratoriums der Royal Institution. Die von ihm bearbeiteten wissenschaftlichen Probleme gingen meist von technischen Gesichtspunkten aus und zeitigten große praktische Erfolge. Hierher gehören die Gewinnung von Ammoniak und Heizgas, dem sogenannten Mondgas, die des Nickel-Tetracarbonyls und reinsten Nickels usw.

Literatur. *Nekrolog von* ***Langer*** *im Ber. 43, 3665.*

E. von Meyer.

Moose.

Bryophyten.

Umgrenzung. Als Archegoniaten bezeichnen wir Pflanzen, deren weibliche Sexualorgane durch die Archegonien, deren männliche durch charakteristische Antheridien repräsentiert werden. In der ganzen Gruppe der Archegoniaten wechselt die Geschlechtsgeneration (Gametophyt, X-Generation) mit der ungeschlechtlichen (Sporophyt, 2-X-Generation) regelmäßig ab.

Bei den Farnen ist der Gametophyt, kurzlebig, der Sporophyt ausdauernd und meist von erheblicher Größe (sogenannte Farnpflanze, vgl. den Artikel „Farnpflanzen").

Bei den Moosen ist der Gametophyt, besonders in einigen Teilen (Moospflänzchen), langlebig, meist mehr- oder vieljährig, während der Sporophyt, die sogenannte Mooskapsel, nur so lange aushält, bis in ihr die Sporen gebildet sind.

Skizzieren wir den Entwickelungsgang eines Mooses in kurzen Zügen: Die Moosspore ist einzellig. Bei der Keimung geht aus ihr ein grüner, oft verzweigter Faden hervor, das Protonema. An diesem ent-

stehen die Moospflänzchen, welche entweder einen einfachen Thallus (viele Lebermoose) oder einen beblätterten Sproß (Lebermoose und fast alle Laubmoose) darstellen. Die Moosstämmchen sind die Träger der Geschlechtsorgane, sie werden deshalb auch als Gametophoren bezeichnet. Archegonien und Antheridien pflegen an diesen letzteren gruppenweise beisammen zu stehen, aber meistens so, daß männliche und weibliche Organe relativ weit voneinander entfernt sind. Durch Befruchtung der im Archegonium vorhandenen Eizelle entsteht eine Zygote, welche dann zum Sporophyten heranwächst. Dieser besitzt keine Blätter und bleibt als Halbparasit bis zu seinem Lebensende mit dem Gametophyten in Verbindung.

Das eben Gesagte gilt für alle Moose. Die ganze Gruppe aber zerfällt in Laubmoose und Lebermoose.

1. Laubmoose. Protonema gut ausgebildet, meist fadenförmig, oft noch selbständig fortvegetierend, nachdem es bereits Moospflänzchen erzeugt hat. Das Moospflänzchen ist nie ein Thallus, sondern ein 2-, 3- oder mehrreihig beblättertes Stämmchen; die Blätter meist mit einem Mittelnerv. Die junge Kapsel zerreißt die Archegonwand und hebt deren oberen Teil als Mütze mit empor. Die Sporen entstehen aus einer inneren Gewebeschicht, die fast stets um eine zentrale Gewebemasse, die Columella, herumgelagert ist. Die Kapselwand ist fest, der obere Teil löst sich gewöhnlich in Form eines Deckels vom unteren Teile, der Urne, ab. Peristom ist vielfach vorhanden, Elateren nie.

2. Lebermoose. Protonema klein und unbedeutend. Das Lebermoospflänzchen entweder ein dichotom verzweigter, flacher Thallus, oder ein 2- bis 3reihig beblätterter Stengel; die Blätter fast ausnahmslos ohne Mittelnerven. Die Kapsel bleibt bis zur Sporenreife von der Archegonwand umgeben und durchbricht sie meistens am Scheitel, ohne sie jedoch als Calyptra mit emporzuheben. Sämtliche Gewebezellen der Kapsel, mit Ausnahme der Wand, werden zu Sporen umgebildet, oder aber ein Teil derselben bleibt steril und wird zu Schleuderzellen (Elateren). Die Kapsel öffnet sich nicht mit einem Deckel, sondern springt an ihrem Scheitel longitudinal, oft vierklappig, auf. Peristom nie vorhanden.

Wir wollen nun diese Gruppen gesondert besprechen, und zwar zunächst die einzelnen Entwickelungsstufen der Laubmoose.

A. Laubmoose.

1. Protonema. Die einzellige Spore enthält einen Kern. Sie ist umgeben von zwei Häuten, der zarten Intine und der derberen Exine. Letztere ist meistens braun gefärbt, verkorkt oder mit anderen ähnlichen Einlagerungen versehen. Außerdem trägt sie vielfach Vorsprünge, Leisten u. ä., welche zur Verbreitung der Sporen in engster Beziehung stehen.

Auf geeignetem Substrat keimt die Spore, die Exine reißt auf, der Inhalt der Spore tritt, von der Intine umgeben, heraus und wächst zu einem grünen Faden heran. Dieser ist anfangs einfach und wenigzellig, verzweigt sich dann reichlich und läßt viele, aus einer Zellreihe bestehende Aestchen erkennen, welche grün gefärbt sind — Chloronema — und natürlich über dem Erdboden wachsen. Das Chloronema entsendet in den Boden farblose oder braune Rhizoiden.

Das Protonema wächst sowohl an den Haupt- wie an den Nebenzweigen durch Teilung der Endzellen. Die Querwände stehen in auffallender Weise schräg, woran die Protonemata sofort von mancherlei ähnlichen Gebilden zu unterscheiden sind.

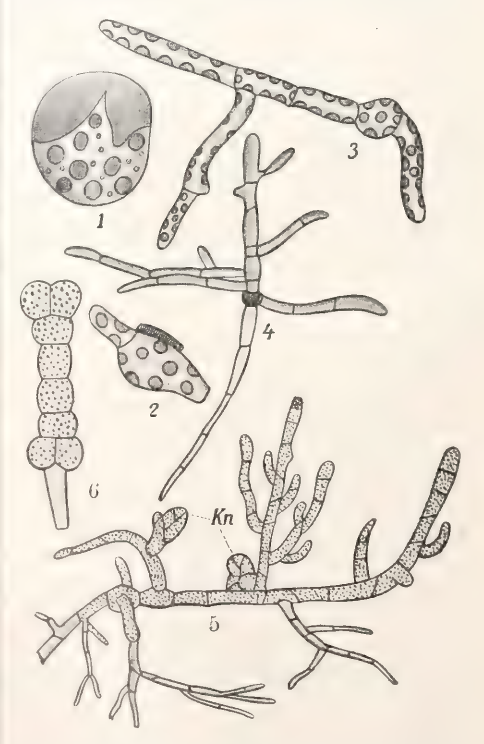


Fig. 1. Protonema v. Funaria. 1 bis 3 jüngere Stufen. 4 im Dunkeln erwachsen. 5 erwachsenes Protonema mit Stammknospen (Kn). 6 Brutzellen.

Im Lichte kriecht das Protonema auf dem Boden und entsendet nur seine Seitenzweiglein in die Luft (Fig. 1, 5). Im Dunkeln richten sich alle Sprosse auf (Fig. 1, 4). Unter besonderen Bedingungen, zumal unter solchen, welche die Entwickelung der

Stämmchen hemmen, kann das Protonema außerordentliche Dimensionen unter reichster Verzweigung erreichen und auch lange Zeit in diesem Zustande verharren.

Das Protonema kann sich durch Brutzellen vermehren. Die Spitzen der Zweige teilen sich wiederholt längs und quer, (Fig. 1, 6,) die gebildeten Zellen runden sich ab und lösen sich von der Pflanze los, nachdem sie sich mit Reservestoffen gefüllt haben. Unter geeigneten Bedingungen keimen sie zu neuen Protonemen aus.

Die eben beschriebene Form des Protonemas ist die übliche. Es seien nun noch folgende Abweichungen davon erwähnt:

1. Ephemeropsis tjibodensis Goebel (Fig. 2) lebt in den feuchten Urwäldern West-Javas. Das Moospflänzchen ist hier stark reduziert, dagegen ist das Protonema wohl entwickelt und weit differenziert, es besorgt auch die Ernährung der Kapsel. Das Protonema bildet algenähnliche, gelbgrüne bis rotbraune, filzige Ueberzüge auf Phanerogamen- und Pteridophytenblättern. Wir unterscheiden an ihm eine kriechende Hauptachse und ebensolche Nebenachsen von dorsiventralem Bau; nach oben entsenden die Achsen aufrechte Assimilatoren (ass), an ihren Seiten entspringen Haftorgane, die sogenannten Hapteren (hu), mit welchen das Protonema am Substrat festsitzt. Die Querwände sind nicht schräg, sondern quer gestellt, aber gekrümmt. Die Assimilatoren endigen mit einer borstenförmigen Spitze und tragen seitlich dichotom verzweigte Aeste, welche wohl hauptsächlich die Photosynthese besorgen. Das Protonema vermag eigentümliche Brutkörper zu bilden.

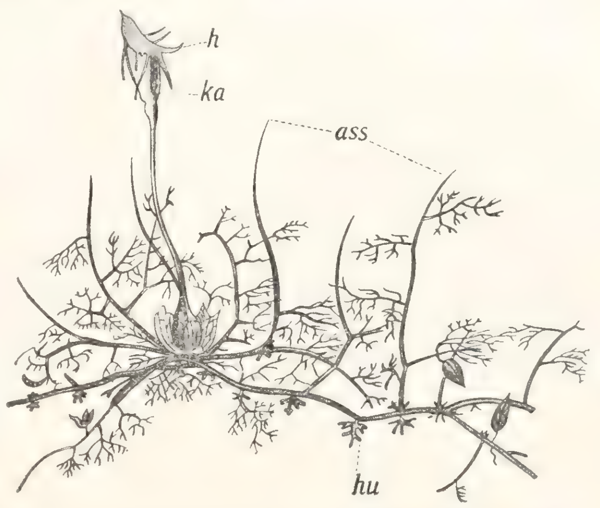


Fig. 2. Ephemeropsis mit stark entwickeltem Protonema. ass Assimilatoren, hu Hafter, ka Kapsel, h Haube.

Stark entwickelte Protonemata haben auch die heimischen Gattungen, Bruchia, Ephemerum, Pleuridium, Funaria u. a. Auch hier handelt es sich meistens um schwach entwickelte und hinfällige Stämmchen, während die Protonemafäden oft ausdauern.

2. Schizostega osmundacea wächst an dunklen Orten, mit Vorliebe in Felsenhöhlen. Von dem gewöhnlich fadenförmigen Protonema erheben sich Zweige, welche flächenförmige Gebilde tragen; diese stellen sich senkrecht zum einfallenden Licht. Sie bestehen aus stark gewölbten, linsenförmigen Zellen, welche die Chromatophoren auf der vom Licht abgekehrten Seite tragen. Das Licht wird durch die als Konvexlinse wirkende Vorderwand gebrochen und konzentriert an die gegenüberliegende Wand geworfen, an der die Chloroplasten liegen. Es wird so eine möglichst starke Ausnutzung der in den Felslöchern gegebenen geringen Lichtmenge erreicht. Ein Teil des Lichtes aber wird reflektiert, so daß das Moos ein smaragdgrünes Leuchten zeigt, das ihm den Namen Leuchtmoos verschafft hat.

3. Die Sphagnum-Arten zeigen bei normaler Belichtung scheibenförmige Protonemen.

4. Die Andreaea-Arten zeichnen sich ebenfalls durch mehrreihige Protonemen aus, die jedoch bandförmig sind, wodurch die Festheftung an den Felsblöcken, auf denen das Moos wächst, erleichtert wird.

5. Bei Tetraphis, Oedipodium und Tetradontium entstehen am Protonema flächenförmige Zweige, sogenannte Protonemablätter, die der Photosynthese dienen. Uebergänge von ihnen zu gewöhnlichen Laubblättern sind zumal bei Oedipodium häufig. Bei Tetraphis bilden sich bei schwacher Belichtung sogenannte Protonemabäumchen aus, nach Correns Uebergangsgebilde zwischen Protonema und Moospflänzchen.

2. Moosstämmchen. Bildung desselben. Die Moosstämmchen werden vom Protonema gebildet. In einer Ausstülpung einer Protonemazelle, welche anfänglich von einer Anlage eines gewöhnlichen Protonemafadens nicht zu unterscheiden ist, entsteht eine schiefe Wand, die eine obere von einer unteren Zelle trennt. In der oberen Zelle bildet sich nun eine Wand senkrecht zur ersteren und — mit Ausnahme von Fissidens, die eine zweiseitige Scheitelzelle besitzt — bald eine dritte Wand, wodurch eine dreiseitig pyramidale Scheitelzelle entsteht (Fig. 3). Diese Scheitelzelle bildet nun durch weitere Teilungen zunächst ein kurzes Stämmchen mit einigen Blättern, die sogenannte Moosknospe, aus der dann das Moosstämmchen mit seinen Blättern hervorgeht.

Zur weiteren Informierung betrachten wir (Fig. 4) einen Längsschnitt durch den Scheitel eines Moosstämmchens. Die Scheitelzelle v gliedert, wie bekannt, nach drei Richtungen Segmente ab; im Schnitt sind natürlich nur zwei Reihen derselben sichtbar. Jedes

Segment wird zunächst durch eine perikline Wand, die sogenannte Blattwand (a, Fig. 4) in ein äußeres und ein inneres Stück zerlegt. Aus dem inneren Stück entstehen durch weitere Teilungen die zentralen Gewebspartien des Stämmchens, aus dem äußeren Stück das periphere Stammgewebe und die Blätter. Bei Entwickelung der letzteren wird das periphere Stück der Segmente durch eine Horizontalwand b in zwei Hälften zerlegt, die obere wölbt sich nach auswärts vor und durch eine Wand c wird dann eine Scheitelzelle abgegliedert, welche durch wiederholte Teilungen nach zwei Richtungen dem Blatt den Ursprung gibt. Da jedes Segment ein Blatt liefert, ergeben sich drei Blattreihen.

Fig. 3. Protonema von Barbula ruralis f assimilierende Fäden. kn Moosknospe. Nach Müller-Thurgau.

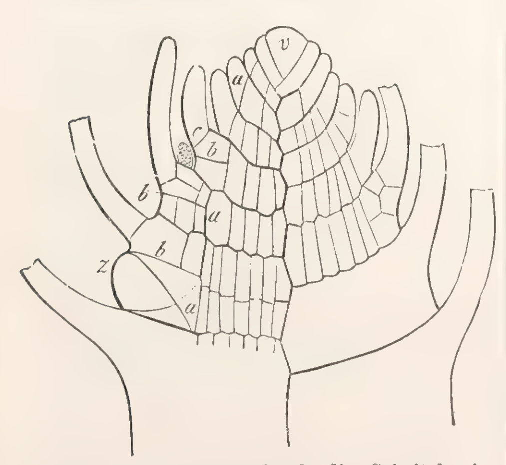


Fig. 4. Längsschnitt durch die Scheitelregion eines Stämmchens von Fontinalis antipyretica. v Scheitelzelle, a die Blattwand, b unterer Teil des Blattes, c Scheitelzelle des Blattes, z Seitensproß. Nach Leitgeb.

Die unterhalb b gelegene Zelle wird vielfach durch einfache Längs- und Querwände zu Rindengewebe aufgeteilt; in gewissen Fällen aber setzen unter der Blattbasis (b) antikline Teilungen ein und führen zur Bildung einer neuen Scheitelzelle (z); diese kann dann zu einem Seitenzweig auswachsen. Sonach stehen die Seitensprosse der Moose immer in einer gewissen Beziehung zu einem Blatt, sind aber nicht axillär wie bei den höheren Pflanzen.

Bemerkt sei noch, daß die Scheitelzelle des jungen Zweiges bei Fontinalis in unserer Figur unter der Mittellinie des Blattes liegt, bei den meisten Gattungen ist sie aber seitlich neben dieselbe geschoben.

Das erwachsene Moosstämmchen (Fig. 5) gliedert sich dann in Stamm, Blatt und Rhizoiden. Die Rhizoiden sind verzweigte Zellreihen, welche, vielfach braun gefärbt, in den Boden eindringen und aus diesem Nahrung aufnehmen.



Fig. 5. Mnium affine mit Ausläufern an der Basis der Sprosse. Nach Schimper.

Die Stämmchen sind in ihrer Verzweigung ganz außerordentlich verschieden. Manche Familien entwickeln an den Hauptstämmen nur verhältnismäßig wenige Seitenzweige (Fig. 6). Diese legen sich dann in der Regel neben die Sprosse 1. Ordnung und endigen auf derselben Höhe wie diese. Häufig schließen die Zweige verschiedener Ordnung dicht zusammen und bilden dann

Polster, die mehr oder weniger fest sind. Die Moosstämmchen sterben an ihrer Basis regelmäßig ab, und infolge der Verwesung der abgestorbenen Teile werden die einzelnen Zweige dann isoliert. Das geht jahraus, jahrein weiter. Immer wird die nächst jüngere Generation von Seitensprossen selbständig gemacht. Aus dem Gesagten



Fig. 6. Catharinea undulata mit Sporogonien Nach Schimper.

ergibt sich auch, daß solche Moose im Boden nicht fest verankert sein können; die ursprünglich in denselben eindringenden Rhizioden werden mit zerstört. Und tatsächlich haben wir denn auch, namentlich auf dem Waldboden, Moosdecken, welche diesem nur lose aufliegen. Moose und Moospolster auf Baumstämmen und Felsen müssen sich natürlich etwas anders verhalten, hier wird selbstverständlich durch die Rhizoiden immer ein Festheften auf dem Substrat bewirkt.

Es gibt aber auch nicht wenige Moose, welche ihre Aeste unter einem großen Winkel von der Hauptachse abstehen lassen. In man-



Fig. 7. Brachythecium salebrosum mit Sporogon. Nach Schimper.

chen Fällen bilden auch sie nur relativ wenig Seitenäste (Fig. 7) in anderen aber ist die Zahl derselben recht groß (Fig. 8). Die Seitenäste



Fig. 8. Hypnum crista castrensis. Nach Schimper.

können allseitig orientiert sein, mit besonderer Vorliebe aber stellen sie sich in eine Ebene, so daß sehr schön gefiederte Formen zum Vorschein kommen (Fig. 8). Diese Stellung der Aeste ist aber nicht die primäre,

vielmehr werden dieselben erst sekundär nach Anlegung der Scheitelzelle in diese Lage gebracht, und zwar geschieht dies meistens durch äußere Faktoren als da sind Licht, Schwere usw.

Neben diesen Haupttypen treten natürlich noch mannigfach andere auf. Schon oben deuteten wir an (Ephemeropsis usw.), daß nicht wenige Moose ganz kurz entwickelte Stämmchen haben (s. a. Buxbaumia), aber auf der anderen Seite finden wir auch Arbeitsteilungen in den Sprossen, die zu Rhizombildungen führen. Solche sind z. B. gegeben bei Catharinea (Fig. 6) und Mnium (Fig. 5). Die Laubsprosse erzeugen kriechende Achsen; diese führen z. T. Niederblätter und liefern außerdem neue, normal beblätterte Achsen.

Der Stamm hat im allgemeinen einen sehr einfachen anatomischen Bau. Es gibt Moosstämmchen, welche aus annähernd gleichartigen, nur wenig langgestreckten Zellen aufgebaut sind. In den meisten Fällen aber kann man unterscheiden einen Zentralkörper und eine Rinde (Fig. 9).

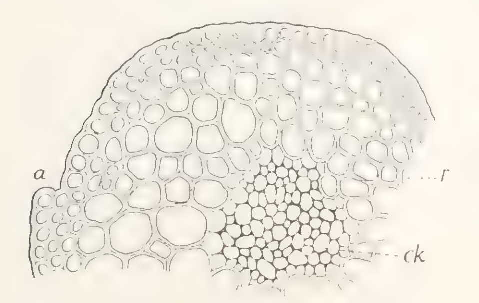


Fig. 9. Querschnitt des Stämmchens von Gymnostomum. r Rinde, ck Zentralkörper, a Blattansatz. Nach Lorenz.

Die oberflächlich gelegenen Zellen der Rinde sind in der Regel stark verdickt und häufig intensiv gebräunt. Sie haben offenbar mechanische Funktion, wenn sie auch lebenden Inhalt führen. Die Wände der weiter nach innen gelegenen Rindenzellen pflegen etwas dünner zu sein, in ihnen erkennt man plasmatischen Inhalt, einige Chromatophoren usw. Der Zentralkörper besteht aus recht dünnwandigen Zellen, die aber ganz außerordentlich langgestreckt sind und den Charakter von Leitungsbahnen haben. Meistens wird angegeben, daß sie keinen lebenden Inhalt führen; doch scheint mir das nicht ganz sicher zu sein.

Es gibt nun aber einige hochentwickelte Moose, (Dawsonia, Polytrichum, Catharinea u. a.), bei welchen eine weitere Differenzierung des Zentralkörpers eingetreten ist (Fig. 10). In der Mitte liegt ein aus teilweise verdickten und langgestreckten Zellen bestehendes Gewebe, das nach Angabe der meisten Forscher nicht mehr lebendig ist. Es wird vielfach als Hydroidgewebe bezeichnet. Auf diese folgt nach außen eine

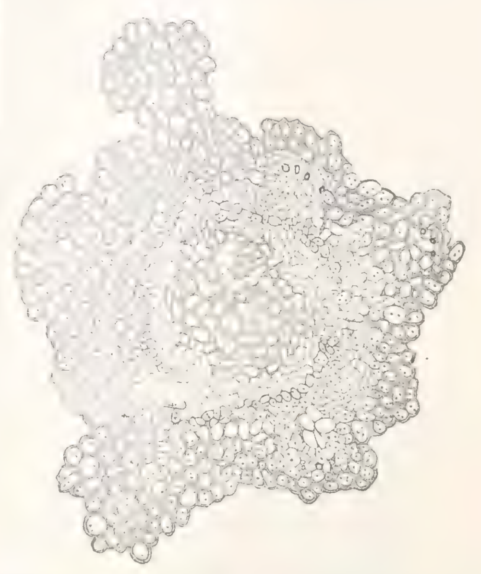


Fig. 10. Querschnitt des Stämmchens von Polytrichum commune. Nach Tansley und Chick.

Stärkescheide, dann dünnwandige Zellen (Leptoiden), die man gern mit Siebröhren vergleicht. Dieses Gewebe wieder wird umgeben von einem pericykelähnlichen Mantel,

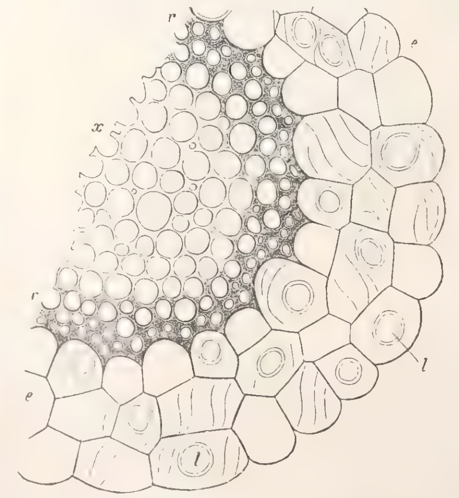


Fig. 11. Querschnitt des Stämmchens von Sphagnum cymbifolium. x innere Zellen mit farblosen Wänden, r Rindenzellen, ee periphere Rindenschicht, l Löcher, durch welche die Zellen derselben miteinander kommunizieren. Nach Sachs.

welcher die innerste Schicht der Rinde darstellt. Sie ist normal gebaut, wird aber von Leptoiden durchzogen, welche einerseits mit dem Zentralkörper, andererseits mit ähnlich gebautem Gewebe des Blattes in Verbindung zu stehen scheinen. Das ist die übliche Darstellung. Völlig geklärt scheint mir auch heute der Sachverhalt noch nicht zu sein.

Die Zentralkörper der verschiedenen Moose sind offensichtlich Leitungsbahnen für verschiedene Stoffe. Ob sie auch in ausgiebigem Maße der Wasserleitung dienen, ist zum

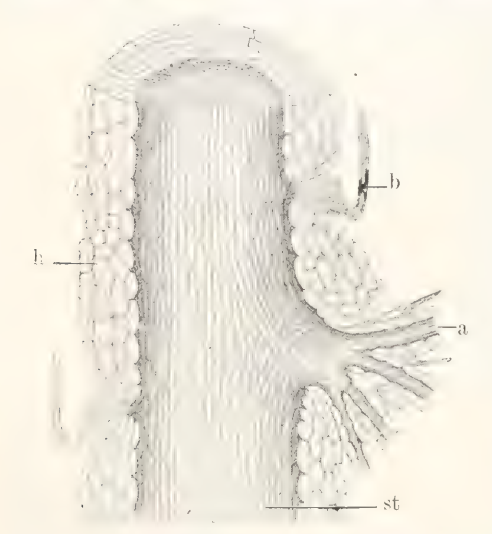


Fig. 12. Längsschnitt durch den Stamm (st) von Sphagnum cymbifolium mit der farblosen Hülle (h), den Aesten (a) und den Blättern (b). Nach Schimper.

mindesten zweifelhaft: denn die Wasserversorgung der Moospflanze geschieht von außen her. In der ausgeprägtesten Form erfolgt eine solche bei den Sphagnum-Arten. Hier ist der Stamm entsprechend gebaut, wir finden im Innern desselben keinen Zentralstrang (Fig. 11), sondern nur annähernd gleichmäßige, etwas verdickte Zellen. Wie durch einen Mantel aber wird der Stamm umhüllt von mehreren Lagen großer, farbloser Zellen (Fig. 11 u. 12). Diese sind dünnwandig, ohne jeden lebenden Inhalt, sie stehen untereinander durch breite Oeffnungen, welche an ihren Rändern ringförmig verdickt sind, in Verbindung. Die peripher gelegenen Zellen können auch nach außen hin Oeffnungen aufweisen.

3. Die Blätter. Alle Moosblätter sind ursprünglich einfache Zellplatten, aus annähernd 6eckigen Zellen gebildet; bei kleinen Formen, wie Ephemerum, bleiben sie dies zeitlebens, meistens bilden sie aber einen Mittelnerv aus, d. h. eine durch Teilungen parallel der Oberfläche der Blattanlage entstandene, nachträgliche Verdickung des mittleren Blatteiles, welche aus verlängerten Zellen besteht. Selten sind Moose mit mehr als einem Mittelnerven. Häufig finden sich auch am Rande der Blätter etwas langgestreckte Zellen, welche offenbar das Ganze festigen.

Sehr eigentümlich ist die Ausbildung der Blätter bei den Fissidentaceen. Auf der Unterseite des Blattnerven bildet sich bei diesen Moosen ein flügelartiger Auswuchs (Fig. 13), der später so groß wird, daß er scheinbar das eigentliche Blatt darstellt, während das letztere als Scheidenteil des Flügels erscheint.

Ganz besonders entwickelt sind wieder die Blätter der Polytrichaceen. Bei diesen kann man meistens eine Scheide und eine Spreite deutlich unterscheiden. Die Spreite ist bei Catharinea noch gut entwickelt, aber wir sehen bereits, daß der recht derben Mittelrippe eine Anzahl von längs verlaufenden Lamellen aufgesetzt sind. Das ist dann bei Polytrichum ins Extrem getrieben. Die Spreite erscheint hier fast auf die Mittelrippe reduziert (Fig. 14). Diese weist dickwandige Zellen und daneben Leptoiden auf, wie wir sie früher für die Stämmchen geschildert haben. Dieser ganze Teil des Blattes ist annähernd farblos. Die Chromatophoren finden sich in Lamellen, welche der Oberseite der Rippe vertikal aufgesetzt sind und auf dieser untereinander parallel von der Basis bis zur Spitze laufen. Im Querschnitt erscheinen sie dann als Säulchen, die aus einer mäßigen Anzahl von grünen Zellen aufgebaut sind (Fig. 14).

Ihrer Entstehung gemäß stehen die Blätter ursprünglich in drei Zeilen. Diese Stellung wird bei manchen Moosen auch beibehalten, vielfach treten aber auch hier Verschiebungen ein, so daß einerseits ganz

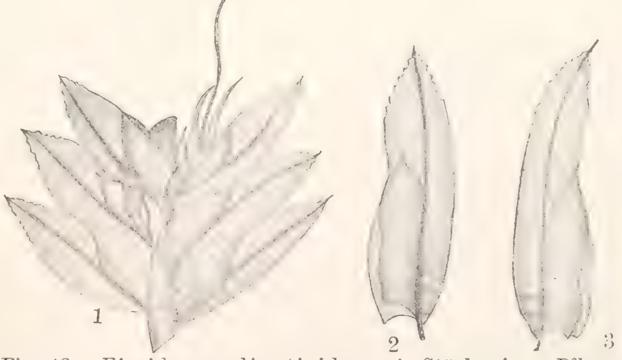


Fig. 13. Fissidens adiantioides. 1 Stück einer Pflanze mit Sexualsprossen, 2, 3 Blätter. Nach Schimper.

unregelmäßige, andererseits aber auch zweizeilige Stellungen resultieren.

Wir sagten schon oben, daß die Wasserversorgung der Laubmoose von außen her geschieht. Die Moosrasen, welche den Boden des Waldes bedecken, saugen sich bei Regen mit Wasser ganz voll und leben von diesem Vorrat über die regenlose Zeit. Dann trocknen sie ein, um den nächsten Niederschlag abzuwarten. Sie wirken dadurch ganz außerordentlich auf eine gleichmäßige Verteilung des Wassers in dem unter ihnen liegenden Waldboden. Auch die Moose der Baumstämme, der Zäune und Felsen, nicht minder auch diejenigen auf freien Flächen der Moore usw. leben in ähnlicher Weise. Unterschiede sind nur insofern gegeben, als die Einrichtungen zum Speichern des Wassers sehr verschiedene Vollkommenheit besitzen.

Das einfachste Mittel, um das Wasser festzuhalten, ist gegeben durch die gegenseitige Deckung der Moosblätter. Betrachtet man einmal ein solches Moos genau, so findet man (Fig. 15), daß zahlreiche Blätter löffelförmig gestaltet sind, und daß sie sich mit ihren Rändern in sehr vollkommener Weise decken. So entstehen Hohlräume um die Stämmchen, und wenn diese sich mit Wasser füllen, sind die letzteren wie mit einem Wassermantel umgeben. Die Aufnahme des Wassers in die Pflanze muß dann durch die Blätter selbst erfolgen.

In manchen Fällen decken sich nur die Blattbasen, die Blattspitzen werden abgekrümmt. Das ändert an der Speicherung des Wassers nichts Wesentliches und prinzipiell dieselbe ist sie auch, wenn die Moosblätter fast haarartig werden; dann hält eben diese feine, schwammige Masse das Wasser fest. Wieder andere Moose besitzen um ihr Stämmchen einen ungemein dichten Mantel, der aus unzähligen, reich verzweigten Rhizoiden aufgebaut wird, welche der Oberfläche des Stammes entspringen. Daß diese wie eine Filzhülle wirken und massenhaft Wasser aufnehmen können, liegt auf der Hand. Wie die Rhizoiden wirken auch die Paraphyllien, das sind vielzellige, blattähnlich verbreiterte, auch verzweigte Gebilde, welche an beliebigen Orten der Stammoberfläche entspringen.

Die dicht gestellten Auswüchse auf der Oberfläche des Blattes, die wir bei Polytrichum und seinen Verwandten kennen gelernt haben, dienen zweifellos auch der Festhaltung des Wassers. Für die Verteilung



Fig. 14. Querschnitt eines Blattes von Polytrichum. Die großen Lamellen quer durchschnitten. Nach Goebel.



Fig. 15. Hypnum cuspidatum. st Stiel des Sporogoniums. Nach Schimper.

desselben dürften ferner in Frage kommen die sogenannten Mamillen (Timmia, Bartramia), d. h. Vorwölbungen der einzelnen Zellmembranen nach außen, welche den mit ihnen versehenen Moosen ein eigenartig mattes Aussehen verleihen. Dem gleichen Zweck dienen wohl Papillen, das sind zentrifugale Verdickungen der Zellwand, wie sie bei Hedwigia ciliata, Racomitrium, Grimmia u. a. gefunden werden.

Ganz besonders gebaut für die Wasserbewegung sind aber die Blätter von Sphagnum, Leucobryum, Calymperes, Syrrhopodon u. a. Die Blätter von Sphagnum bestehen aus einer Schicht von Zellen (Fig. 16), die aber verschieden gestaltet

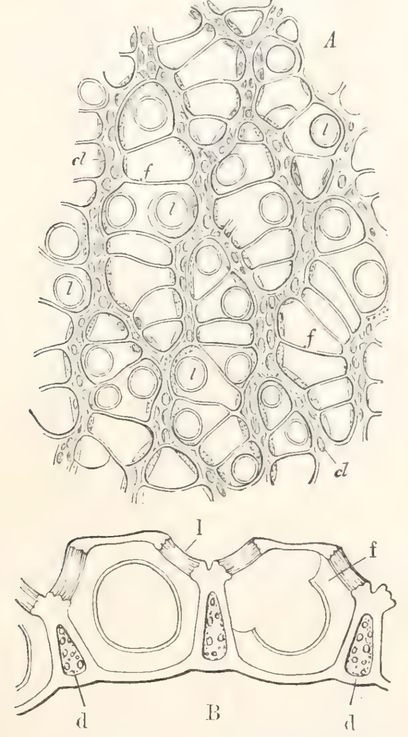


Fig. 16. A Stück eines Blattes von Sphagnum acutifolium. d grüne Zellen, l Oeffnungen, f Aussteifungen der farblosen Zellen. Nach Sachs. B Sphagnum Russowii. Blattquerschnitt. Nach Engler-Prantl.

sind. In ein nach allen Richtungen hin anastomosierendes Netz von relativ kleinen, grünen, assimilierenden Zellen sind erheblich größere farblose Zellen eingelagert. Diese wölben sich, zumal auf der Unterseite, weit über die grünen Zellen hervor. Sie sind mit spiraligen Aussteifungen und mit großen nach außen mündenden Oeffnungen versehen. Protoplasma führen sie nicht. Die Sphagnum-Arten leben auf nassem Boden, besonders auf Mooren. Das Wasser steigt nun bis in die Spitzen der Moose hinein, indem es teils den Mantel farbloser Zellen benutzt, der den Stamm umgibt (S. 1055), teils aber in den Blättern von einer farblosen Zelle zur anderen vermöge besonderer Einrichtungen übertritt. Von einem Blatt zum anderen gelangt es dadurch, daß die Ränder und damit auch die farblosen Wasserzellen sich berühren.

Leucobryum ist im Prinzip ähnlich gebaut wie Sphagnum, doch liegen die farblosen Zellen in 2 Schichten übereinander. Das Moos kommt auf wesentlich trockeneren Standorten (in Wäldern) vor. Bei ihm dürfte es sich in erster Linie um eine Speicherung des Wassers handeln.

4. Vegetative Vermehrung. Die vegetative Vermehrung der Laubmoose erfolgt auf die mannigfaltigste Weise. Schon oben haben wir erwähnt, daß durch Abfaulen an der Basis die ursprünglich miteinander verbundenen Stämmchen oder Aeste isoliert werden können, um selbständig weiter zu wachsen. Außerdem aber kann fast jedes kleine Stückchen einer Moos-

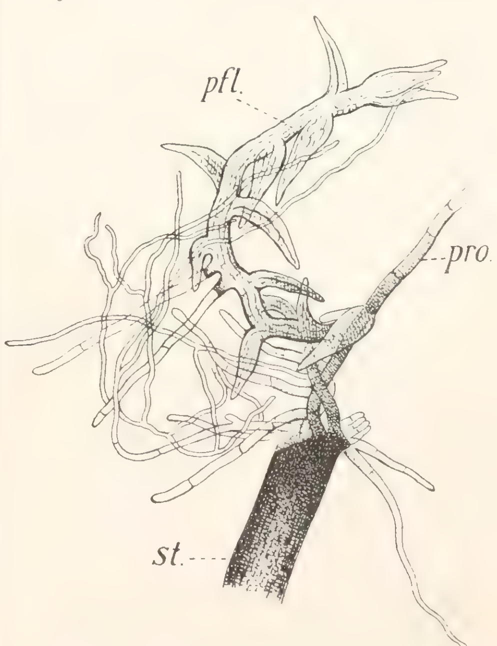


Fig. 17. Stiel (st) eines Sporogons nach der Zerstückelung Protonema (pro) und Moospflänzchen (pfl) bildend. Nach Pringsheim.

pflanze, welches von derselben losgelöst wird, ein neues Pflänzchen produzieren. Aus Stücken des Stammes, wie auch aus isolierten Blättern, wie auch aus den Stielen der Kapsel (Fig. 17) und aus dieser selber

wachsen nach der Zerstückelung Protonemata hervor und an diesen entstehen wiederum neue Moospflänzchen.

Daneben bestehen besondere Vorkehrungen zur Vermehrung der Laubmoose. Diese hat Correns etwa in folgender Weise zusammengestellt. Die Organe sind:

1. Stengelbürtige. Das sind solche, bei welchen die Scheitelzelle des losgelösten Teiles einfach weiter wächst. Da gibt es dann:

a) Ganze Brutpflänzchen. Dieselben werden an kurzen Rhizoiden gebildet und lösen sich los, um selbständig weiter zu wachsen.

b) Bruchstämmchen. Die Moosstämme z. B. von Dicranum fragile zerbrechen im trockenen Zustande außerordentlich leicht. Jedes Stückchen wächst in der oben geschilderten Weise aus.

c) Bruchknospen. Die Stämme haben z. B. bei Campylopus flexuosus nahe unter der Endknospe eine Bruchzone, das ist eine leicht zerstörbare Gewebeschicht. In dieser Region brechen die Endknospen ab und wachsen weiter.

d) Bruchzweige, gekennzeichnet dadurch, daß eine Bruchzone an der Basis der Zweige gebildet wird.

e) Brutknospen. Das sind verkürzte Zweiglein, welche ihre Achsen unter Speicherung von Reservesubstanzen verdicken, während die Blätter reduziert werden. Die Scheitelzelle bleibt meistens erhalten. In den extremsten Fällen aber z. B. bei Webera prolifera verliert die Scheitelzelle die Fähigkeit zum Auswachsen und dann werden neue Pflänzchen unter Vermittelung von Protonemen gebildet.

2. Blattbürtige. Diese beginnen ihre Entwickelung immer mit der Bildung eines Protonemas und erst an diesem entstehen dann Moospflänzchen.

a) Bruchblätter sind morphologisch von den gewöhnlichen Blättern nicht unterscheidbar, zerbrechen aber sehr leicht und geben dann neuen Pflanzen den Ursprung.

b) Brutblätter. In ihrer Form modifizierte Laubblätter, welche verdickt werden und vielfach Reservestoffe speichern. Sie werden dann mittels einer besonderen Trennungsschicht von der Achse losgelöst. Hierher gehört u. a. Aulacomnium. Bei ihm stehen an der Spitze der verlängerten streckenweise blattlosen Achsen, zahlreiche kleine, aber verdickte Blätter.

3. Protonemabürtige Brutkörper. Dahin gehören die an den primären Protonemen entstehenden Gebilde, die wir auf Seite 1050 erwähnten und abbildeten. Außerdem aber solche, welche aus einem sekundären Protonema hervorgehen. Zu diesen zählt man vielfach auch die Brutkörper, welche (Fig. 18) in den eigenartigen Brutbecherchen von Tetraphis pellucida stehen. Am Ende des Stämmchens häufen sich Hochblätter, als ob Antheridien gebildet werden sollten. In Mitte derselben aber bilden sich dann auf dünnen einreihigen Fäden annähernd runde Scheibchen, die sich loslösen und dann auswachsen.

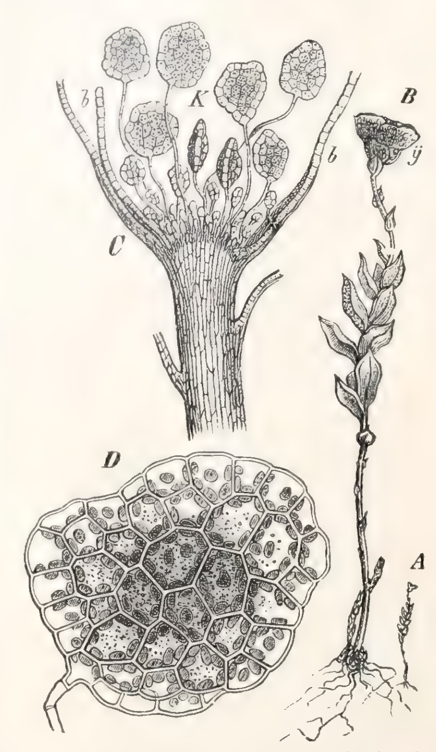


Fig. 18. Tetraphis pellucida. A eine Brutknospen bildende Pflanze in natürlicher Größe. B dieselbe vergrößert; y Hülle um die Brutknospen. C Längsschnitt durch den Gipfel der vorigen, b Hüllblätter, K Brutknospen in verschiedenen Entwickelungsstadien, D reife Brutknospe.

Nach allem wird es nicht wundernehmen, wenn wir schließlich berichten, daß auch aus Rhizoiden die Knospen zu neuen Stämmchen, reservestoffspeichernde Knöllchen usw. hervorgehen (s. a. oben).

5. **Die Geschlechtsorgane.** a. Die männlichen Organe, die Antheridien sehen aus wie gestielte Säcke, deren Wandung aus einer einzigen Zellschicht besteht (s. a. den Artikel „Fortpflanzung der Pflanzen"). Die Wandzellen enthalten Chlorophyllkörner, die im reifen Antheridium orangerote Farbe annehmen. Die Wand umschließt ein kleinzelliges, massives Gewebe, jede der kleinen Zellen enthält ein Spermatozoon, das an seiner Spitze zwei lange Cilien trägt. Wird das reife Antheridium von Wasser benetzt, so platzt die

Wand an der Spitze an einer meist vorgebildeten Stelle, der ganze Inhalt tritt heraus und die Spermatozoiden werden frei, da die Wände der Spermatozoidenmutterzellen verschleimen.

b. Die weiblichen Organe, die Archegonien haben einen kurzen Stiel, dem der eiförmig angeschwollene Archegonbauch aufsitzt, dieser wieder setzt sich nach oben hin in einen langen, manchmal tordierten Hals fort (vgl. den Artikel „Fortpflanzung der Pflanzen"). Die Wand des Halses besteht immer nur aus einer Zellschicht, der Bauch des reifen Archegons ist oft schon von einer doppelten Schicht von Zellen umhüllt. Bauch und Hals umtheridien- oder Archegonienbildung. Damit ist dann natürlich das Längenwachstum der fraglichen Sprosse sistiert. Nur bei Polytrichum geht es weiter. Stehen die Sexualorgane und demnach später auch die Sporogone an den Enden der Hauptsprosse, so nennt man die Moose acrocarp, stehen sie auf kurzen Seitensprossen, so spricht man von pleurocarp. So sehr diese Stellungen den Habitus der Pflänzchen beeinflussen, so sind sie doch kaum von prinzipieller Bedeutung.

Neben den Sexualorganen stehen fast immer Paraphysen, das sind haarähnliche Gebilde, oft mit kugeliger Endzelle (Fig. 19).

Die Geschlechtsorgane sind zu Archegonien-

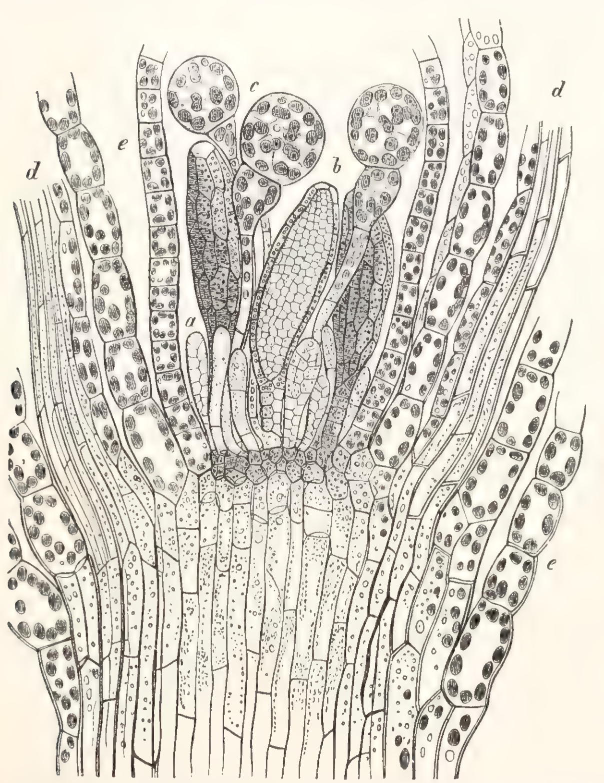


Fig. 19. Längsschnitt durch den Antheridienstand von Funaria. a junge, b reife Antheridien, c Paraphysen, d Hüllblätter. Nach Sachs.

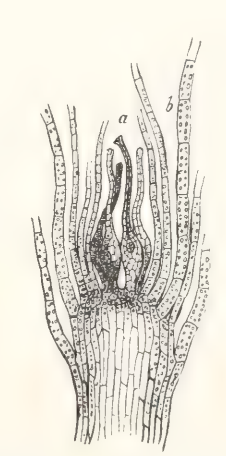


Fig. 20. Archegonienstand eines Mooses. a Archegonien, b Hüllblätter. Nach Goebel.

schließen eine axile Zellreihe, deren unterste Zelle zur Eizelle wird; die übrigen Zellen verschleimen vor der Befruchtung, und der entstandene Schleim preßt die vier Zellen, welche den Hals an seinem Ende verschließen, auseinander.

Die Antheridien wie auch die Archegonien entstehen an den Sproßspitzen jeweils aus einer Oberflächenzelle. Mit Ausnahme von Polytrichum verbrauchen die Moose auch die Scheitelzelle für die Anoder Antheridienständen vereinigt, die gemäß der eben geschilderten Entstehung den Abschluß der Hauptachse oder auch der Seitenachsen des Moosstämmchens bilden. Sie sind häufig von Hochblättern umhüllt (Fig. 19), wodurch das Ganze eine gewisse Aehnlichkeit mit einem Blütenstand bekommt. Wir brauchen jedoch wohl kaum zu sagen, daß die sogenannte „Moosblüte" und die Blüte einer höheren Pflanze grundverschiedene Dinge sind.

Die Archegonienstände sind in der Regel unscheinbar und weichen in ihrer äußeren Erscheinung vielfach kaum von den normalen vegetativen Endknospen ab (Fig. 19).

Die Antheridienstände dagegen sind viel auffallender und nicht selten durch relativ große Hüllblätter oder durch eine intensive Färbung derselben weithin sichtbar (Fig. 19).

6. **Die Geschlechterverteilung.** Bei vielen Moosen finden sich männliche und weibliche Geschlechtsorgane auf demselben Individuum, andere sind zweihäusig (diöeisch). Doch ist diese Diöcie manchmal nur eine scheinbare. Wenn man nämlich die Moosrasen voneinander trennt, reißt man eventuell Stämmchen auseinander, die ursprünglich zusammengehörten. Männliche und weibliche Pflanzen unterscheiden sich in ihrer äußeren Erscheinung für gewöhnlich nicht oder nur sehr wenig. Natürlich gibt es auch hiervon Ausnahmen und



Fig. 21. 1 Camphothecium aureum mit Zwergmännchen (z). 2 Ein solches isoliert. 3 Fissidens anomalus. 4 Zwergmännchen auf dem Blatt der weiblichen Pflanze. Nach Fleischer.

als Extrem seien jene Arten erwähnt, bei denen die männlichen Individuen so klein sind, daß man von Zwergmännchen spricht. Es ist dies der Fall bei Arten der Gattungen: Dicranum, Braunfelsia, Dicnemon, Leucobryum, Fissidens, Schlotheimia, Hypnum, Racromitrium, Camptothecium (Fig. 21). Bei diesen Moosen keimen die Sporen, die die Zwergmännchen liefern, auf den Blättern der weiblichen Pflanzen, die männlichen Pflanzen sitzen also auf diesen. Hier scheint wenigstens physiologische Heterosporie mit entsprechender Diöcie vorzuliegen. Die Frage, ob wirklich echte Diöcie bei den Moosen vorkommt, ist überhaupt noch nicht ganz entschieden; hat man doch bei scheinbar echt diöcischen Moosen nachweisen können, daß es von den Ernährungsbedingungen abhängt, ob die Pflanze Archegonien oder Antheridien bildet.

7. **Befruchtung.** In der Natur öffnen sich die Antheridien, wenn die Moose durch Regen oder Tau befeuchtet werden. Die Spermatozoiden werden in die Wassertröpfchen aufgenommen und mit diesen zu den Archegonien hingeführt. Bei manchen Moosen findet verhältnismäßig selten eine Befruchtung statt. Das kann seinen Grund in einer unzureichenden Uebertragung der Spermatozoiden haben, vielfach aber ist es bedingt durch die unzureichende Zahl der männlichen Pflanzen.

Die Spermatozoiden, welche an die Oeffnung der Archegonien kommen, schlüpfen durch den Schleim im Halse derselben bis zur Eizelle vor und befruchten diese. Infolge der Befruchtung entsteht eine Zygote. Ueber alles dieses soll in dem Artikel „Fortpflanzung der Pflanzen“ berichtet werden.

8. **Entwickelung des Sporogons.** Wir untersuchen diesen Vorgang zunächst bei den Bryales. Nach der Befruchtung wächst die Zygote unter vielfachen Zellteilungen zum Embryo heran. Dieser ist nur kurze Zeit noch kugelig, erhält dann bald eiförmige Umrisse und wird später zu einem mehr oder minder lang gestreckten fast nadelförmigen Gebilde (Fig. 22), an welchem man schon sehr zeitig den Fuß erkennt. Das ist der Fortsatz des Embryos nach unten hin. Mit diesem schiebt er sich (Fig. 22) in den Scheitel der eigentlichen Moospflanze hinein und tritt mit ihr in enge Verbindung, wird er doch von den Moospflanzen aus dermaßen ernährt, daß man ihn als Parasiten oder als Halbparasiten betrachten möchte.

Inzwischen ist der Hals des Archegoniums geschrumpft (Fig. 22 h). Der Bauch desselben aber folgt dem Wachstum des Embryos oft unter erheblicher Erweiterung, so weit, daß er eventuell einige Millimeter lang werden kann, er heißt dann Calyptra. Endlich aber hört sein Wachstum auf, es entsteht ein Querriß (Fig. 22, 2) und nun bleibt der untere Teil der Calyptra als Vaginula (v) an der Basis des jungen Sporogoniums er-

halten, während der obere Teil als Mütze oder Haube von dem sich immer mehr streckenden Embryo emporgehoben wird (Fig. 22, 2).

Diese Haube bleibt sehr lange Zeit, mindestens bis kurz vor der Sporenreife er-



Fig. 22. 1 Funaria nach Sachs. Längsschnitt durch die Stammspitze und die Calyptra (c), darin der Embryo (f), h Hals des Archegoniums. 2 Anacalypta nach Leunis. st Spitze des Moosstämmchens, a unbefruchtete Archegonien, c Calyptra, v vaginula, s Seta.

halten. Sie nimmt sehr verschiedenartige Formen an (Fig. 23). In manchen Fällen ist sie außerordentlich klein, in anderen aber wird sie zu einem vollständigen Filzhut für die junge Kapsel, wie das z. B. bei Polytrichum der Fall ist (vgl. Fig. 23).

Nachdem die Calyptra zerrissen, beginnt nun auch der Embryo sich weiter zu differenzieren und wir unterscheiden in der Regel bald einen Stiel und eine Kapsel. An der letzteren nehmen wir, wenn wir die Haube abheben, schon ziemlich frühzeitig einen Deckel wahr. Dieser endigt bald in einer langen, bald in einer kurzen Spitze. Seine Form wird häufig als Unterscheidungsmerkmal benutzt.

Untersuchen wir nun die Vorgänge, welche sich im Innern der Zygote und im Embryo vollziehen, so wird erstere zunächst durch eine Querwand 1—1 in einen unteren und in einen oberen Teil geschieden (Fig. 24,5). Aus der unteren Hälfte entsteht durch weitere Teilung der Fuß, den wir schon oben als Saugorgan kennen lernten. Aus der oberen Hälfte der geteilten Zygote entwickelt sich

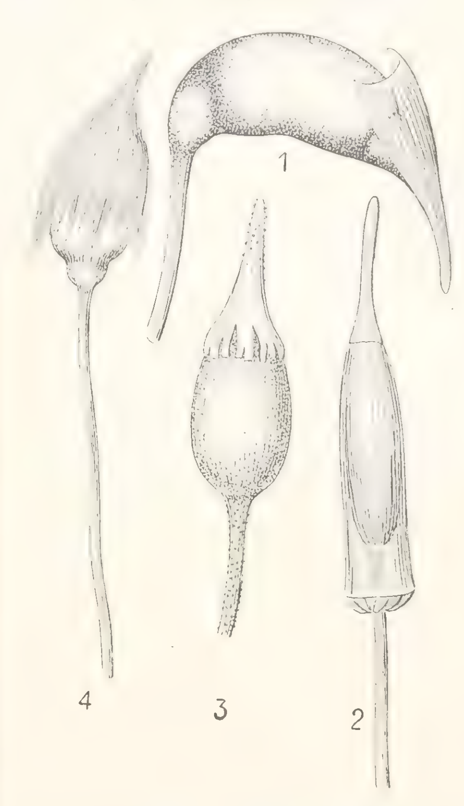


Fig. 23. Hauben. 1 Rhynchostegium, 2 Encalypta, 3 Racomitrium, 4 Polytrichum.

durch mehr oder minder regelmäßige Teilungen (Fig. 24, 6) der fertile Teil des Sporogoniums, nämlich Stiel und Kapsel.

Betrachten wir den Querschnitt (Fig. 24, 1) durch einen jungen Embryo, so finden wir zunächst zwei, dann vier gleich große Zellen. Diese werden durch Wände parallel der Oberfläche (Fig. 24, 1) in vier innere und vier äußere Zellen geteilt. Die ersteren stellen das Endothecium (E), die letzteren das Amphithecium (A) dar. Durch weitere Teilung wird dann sowohl das Amphithecium wie auch das Endothecium mehrschichtig. Weiterhin differenzieren sich im Endothecium die Columella (Col. Fig. 24), und das Archespor. Letzteres ist ausgezeichnet durch sehr inhaltsreiche Zellen und das ist verständlich, denn aus ihm gehen durch weitere Teilungen die Sporen hervor. Das Archespor ist die äußerste Schicht

des Endotheciums. Alles was außerhalb desselben liegt, ist das Amphithecium.

Aber auch damit ist der Entwickelungsgang nicht beendet. Wir sehen vielmehr, daß die unmittelbar an das Archespor angrenzenden Zellen der Columella sich noch weiter teilen und damit zu dem inneren Sporensack werden (i. Sp. S., Fig. 24). Ebenso teilen sich die innersten Schichten des Amphitheciums mehrfach und werden zum äußeren Sporensack (a. Sp. S.). Schon hier sehen wir also, daß das Archespor von diesen beiden Gebilden eingeschlossen ist. Weiter nach außen treten dann im Amphithecium Interzellularräume auf. Und endlich werden die äußersten Schichten zur Kapselwandung. Infolge des Auftretens der Interzellularräume ist dann die Kapselwandung mit dem äußeren Sporensack durch ein lockeres Gewebe verbunden. Ja vielfach erscheint der letztere nur durch zahlreiche Fäden an der Kapselwand aufgehängt.

Vergleichen wir nun mit dem obigen Querschnitt einen Längsschnitt (Fig. 25) des jungen Embryos, so finden wir an ihm zunächst den Fuß (f) entwickelt und auch bereits einen kurzen Stiel (s) angedeutet. Wir überzeugen uns leicht, daß die geschilderten Entwickelungsprozesse sich nur an den oberen Teilen in der bereits etwas angeschwollenen jungen Kapsel vollziehen, und erkennen auch hier leicht Kapselwand, Sporensack (sps), Archespor (sp), und Columella (c), aber wir sehen auch, daß das Archespor nicht die ganze Kapse von oben bis unten durchsetzt, sondern die Columella in Gestalt eines Mantels tonnenförmig umhüllt.

Im Embryo von der abgebildeten Größe gehen dann noch weitere Veränderungen vor sich, und schließlich ergibt ein Längsschnitt durch die fast reife Kapsel eines solchen Mooses ein Bild, wie es Figur 25 zeigt. Wir sehen zunächst an demselben, daß der untere Teil steril bleiben kann. Und diese Region, die in den verschiedensten Gruppen der Bryales sehr verschieden gestaltet sein kann, bezeichnet man als Apophyse (die dunklen Zellen der Fig. 28). In den oberen Teilen der Kapsel ist inzwischen die Kapselwand deutlicher ausgeprägt, der äußere Sporensack tritt schärfer hervor, ebenfalls die Columella (c), endlich tritt auch der Deckel d in die Erscheinung, und wir erkennen vor allen Dingen dort, wo er der eigentlichen Kapsel aufsitzt, besonders geformte Zellen (Fig. 26, r). Diese stellen den Annulus oder Ring dar. Das ist eine, rings um die Basis des Deckels verlaufende, Lage von mehreren Zellen. Der Deckel selber besteht außen aus dickwandigen, meist braun gefärbten Zellen. Unterhalb desselben bemerken wir dann charakteristisch geformte Zellreihen. Das ist das Peristom (p, Fig. 26).

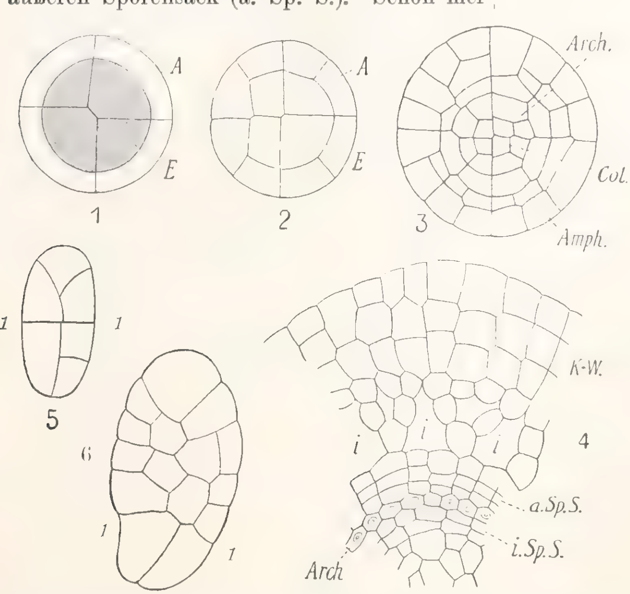


Fig. 24. Entwickelung einer Mooskapsel. 1 bis 4 im Querschnitt, 5 bis 6 Längsschnitt. A (Amph.), Amphithecium, E Endothecium, Arch Archespor, Col Columella, a.Sp.S äußerer Sporensack, i.Sp.S innerer Sporensack Fig. 5. u. 6, 1—1 Querwände.

Fig. 25. Längsschnitt durch eine junge Kapsel von Phascum. f Fuß, s Seta (Stiel), c Columella, sp Archespor, sps Sporensack, gg Trennungslinie zwischen Amphi- und Endothecium. Nach Kienitz-Gerloff.

Sind alle diese Dinge einigermaßen angelegt, so vollziehen sich auch im Archespor (s. Fig. 26) die letzten Teilungen; die einzelnen Zellen desselben runden sich vollkommen kugel-

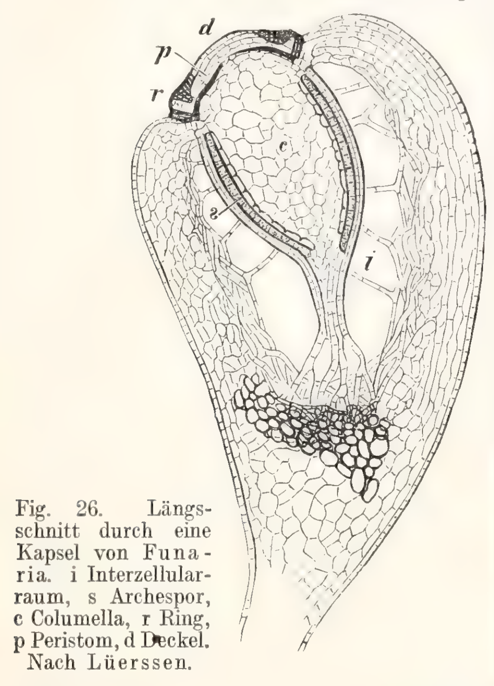


Fig. 26. Längsschnitt durch eine Kapsel von Funaria. i Interzellularraum, s Archespor, c Columella, r Ring, p Peristom, d Deckel. Nach Lüerssen.

förmig ab und lösen sich damit voneinander. Sie stellen dann die Sporenmutterzellen dar, und in diesen werden dann durch Vierteilung (sogenannte Tetradenteilung), die in dem

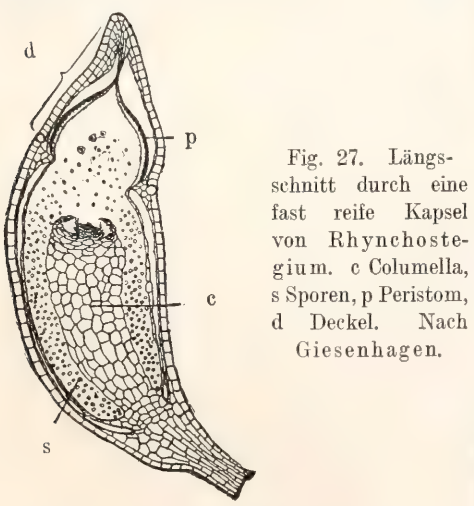


Fig. 27. Längsschnitt durch eine fast reife Kapsel von Rhynchostegium. c Columella, s Sporen, p Peristom, d Deckel. Nach Giesenhagen.

Artikel „Fortpflanzung der Pflanzen“ genauer geschildert werden soll, die Sporen gebildet.

Sind die Sporen vollends ausgereift, dann bemerken wir eine Schrumpfung der Columella (Fig. 27). Endlich wird dann der Deckel durch ein meist charakteristisches Aufreißen oder durch Quellung des Annulus losgelöst und das Peristom wird in Gestalt eines oft sehr zierlichen Mundbesatzes sichtbar, der aus einer größeren Anzahl von Zähnchen (16 und mehr) zusammengesetzt ist.

Das Peristom ist in den verschiedenen Gruppen der Moose außerordentlich verschieden gebaut. Aber wie es auch gestaltet sein möge, seine Struktur läuft immer darauf hinaus, ein plötzliches Ausschütten der Sporen zu verhindern und ein langsames Ausstreuen nach dem Prinzip der Streusandbüchse zu bewerkstelligen. Man kann nun zunächst zweierlei Typen unterscheiden. Die Archidonten, bei welchen die einzelnen Zähne des Peristoms aus ganzen Zellen aufgebaut werden, und die Schizodonten, bei welchen die Zähne nur durch die Wand zerstörter Zellen repräsentiert werden.

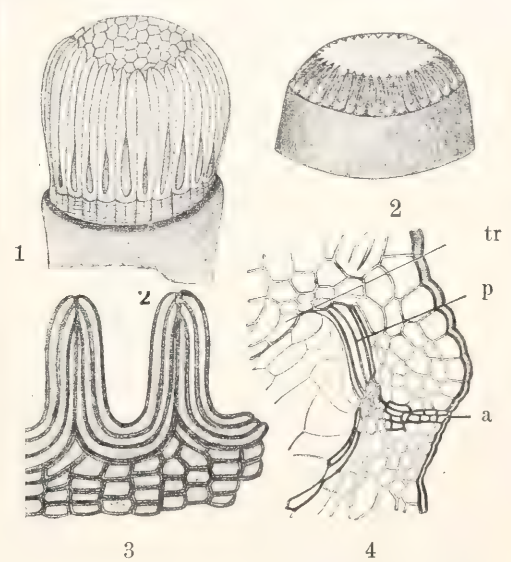


Fig. 28. Peristome von Archidonten 1 Catharinea, 2 Polytrichum halb von oben. 3 Zähne des Peristoms von Polytrichum von der Seite. 4 Stück der Kapsel von Polytrichum längs. Nach Schimper und Lantzius.

Zu der ersteren Gruppe gehören die Polytrichaceen. Wenn wir das Stück eines Längsschnittes durch eine Kapsel von Polytrichum betrachten, so finden wir zunächst einmal bei derselben (a, Fig. 28, 4) den Annulus. An diesen schließen nach oben etwas geneigte Zellen, welche ihre Wand ganz außerordentlich verdicken (p, Fig. 28, 4), und fast faserig erscheinen. Das ist das Peristom, und an dieses schließt eine dünne Haut (tr), welche den ganzen Deckel bis zur gegenüberliegenden Seite durchsetzt. Wird der

Deckel abgeworfen, so erscheinen die Zähne des Peristoms ungefähr so, wie es Figur 28, 3 wiedergibt. Ihr Aufbau aus faserigen Zellen ist dort besonders deutlich. Diese Zähne stehen in erheblicher Zahl um den Rand der Kapsel. Aus Figur 28, 1 und 2 ist ersichtlich, daß sie ein wenig zusammenneigen, und daß über dieselben trommelfellartig jene Haut gespannt ist, von der wir oben redeten. Die Haut ist an der Spitze der Zähne befestigt. Diese selbst schließen seitlich nicht fest zusammen, sondern lassen, wie gespreizte Finger, Zwischenräume frei. Aus diesen seitlichen Oeffnungen werden dann die Sporen allmählich bei trockenem Wetter durch den Wind ausgeschüttelt, genau wie die Samen aus den Mohnkapseln.

Fig. 29. Längsschnitt durch ein Stück der Kapsel von Funaria hygrometrica. D Deckel. P äußeres und inneres Peristom, A Annulus. i Interzellularraum. cc Columella.

Bei den Schizodonten liegt die Sache ganz anders. Betrachten wir Funaria, so finden wir auf einem Teil eines Längsschnitts der Kapsel, wie ihn Figur 29 wiedergibt, zunächst das Archespor und die Columella (cc), welche sich bis in den Deckel fortsetzt. Auch der Annulus (A) und der Deckel (D) sind erkennbar. Unter diesem sehen wir dann eine Schicht von Zellen (P, Fig. 29), welche

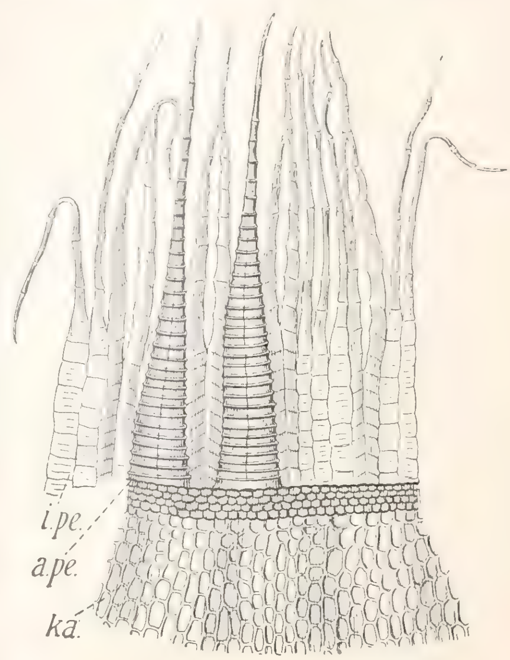


Fig. 30. Kapselrand (ka) von Aulacomnion. a.pe äußeres, i.pe inneres Peristom. Nach Schimper.

in der Nähe des Archespors über den luftführenden Interzellularräumen (i, Fig. 29) beginnt und nach oben zieht. Jede einzelne dieser Zellen verdickt ihre nach auswärts gekehrte Wand, ebenso werden die radial nach einwärts gerichteten Wände mit Verdickungen versehen. Aber diese Verdickungen beschränken sich auf die äußeren Teile der Radialwände, die inneren bleiben ganz unverdickt; verändert werden dann aber noch, in unserem Falle wenigstens, die nach einwärts gekehrten Wände der fraglichen Zellreihe. Wenn jetzt der Deckel abgehoben wird und die Columella vertrocknet, reißen auch die dünnen und unverän-

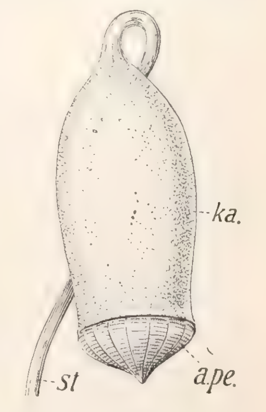


Fig. 31. Kapsel (ka) von Mnium cinclidioides im feuchten Zustande. st Stiel, a, pe äußeres Peristom. Nach Schimper.

derten Teile der eben geschilderten Zellschicht auseinander, erhalten bleiben aber die verdickten, und auf diese Weise geht aus der äußeren Schicht das sogenannte äußere Peristom (a. pe., Fig. 30), aus der inneren das sogenannte innere Peristom (i. pe.) hervor. Die Zellen, welche das Peristom bilden, reißen auch in radialer Richtung auseinander, und so erhalten wir nach Absprengen des Deckels einen Mundbesatz, welcher aus zahlreichen Zähnen besteht, und zwar aus einer äußeren derberen und einer inneren, zarteren Reihe (Fig. 30). Die Zähne der letzteren werden auch Cilien genannt.

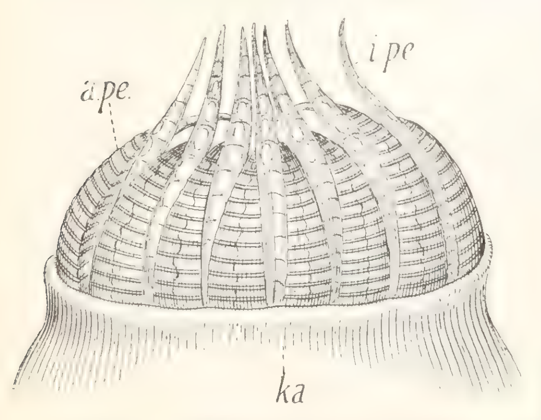


Fig. 32. Kapselrand ka mit Peristom von Mnium cinclidioides, trocken. a.pe äußeres, i.pe inneres Peristom. Nach Schimper.

Die verschiedenen Moose verhalten sich insofern verschieden, als bei manchen nur das äußere Peristom entwickelt wird, während das innere nicht zur Geltung kommt. Aber auch die Form der Zähne ist ungemein verschieden. Trotzdem bleibt allen Vertretern dieser Gruppe gemeinsam die Tatsache, daß die Sporen bei trockenem Wetter aus den Kapseln ausgestreut werden. Das wird möglich durch die hygroskopischen Eigenschaften der Peristomzähne, vor allen Dingen der äußeren. Diese liegen bei feuchtem Wetter im allgemeinen dicht aneinander und verschließen die Kapsel (Fig. 31), bei trockenem Wetter aber krümmen sie sich in irgend einer Weise nach innen (Fig. 32) und sorgen dann dafür, daß die Oeffnung der Kapsel frei wird. Das innere Peristom, soweit es vorhanden, ist kaum hygroskopisch; es bewirkt seinerseits eine Verlangsamung der Sporenausschüttelung. Der eben erwähnte Fall ist der häufigste, in den verschiedenen Familien gibt es mancherlei abweichende Modalitäten der Sporenausstreuung, die natürlich eng mit dem Bau des Peristoms verknüpft sind.

Die eben geschilderte Entwickelung bezieht sich auf die Hauptmasse der Bryales. Eine kleine Gruppe, die man als Archidiales zu bezeichnen pflegt, zeichnet sich durch einen erheblich einfacheren Bau der Kapsel aus. Diese besitzt keinen Stiel, und im reifen Zustande finden wir den ganzen Hohlraum mit Sporen ausgefüllt (Fig. 33, 2); die Wand ist einschichtig, vom Annulus (A) sind höchstens Andeutungen vor-

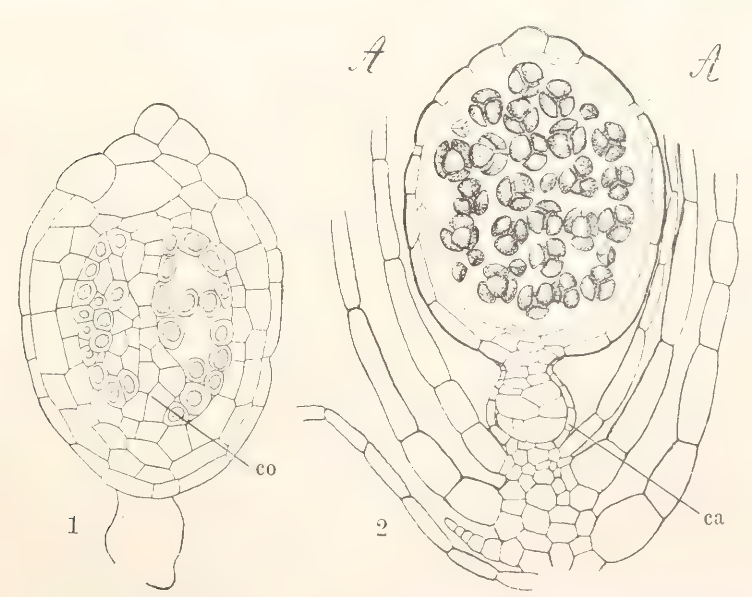


Fig. 33. Sporogone von Nanomitrium tenerum. 1 jung, 2 reif. A Annulus, co Columella, ca Calyptra. Nach Goebel.

handen. Die Sporen werden in den meisten Fällen frei durch unregelmäßiges Aufreißen oder Faulen der Sporogonwand (cleistocarpe Formen). Trotzdem konnte auf jugendlichen Stadien eine, wenn auch primitive Columella nachgewiesen werden (Fig. 35, 1), und das scheint darauf hinzudeuten, daß wir es tatsächlich mit reduzierten Formen zu tun haben, nicht aber mit primitiven Typen, wie das früher allgemein angenommen wurde.

Nicht unwesentlich anders gestaltet sich die Entwickelung des Sporogons bei den Sphagnales (Fig. 34). Bei diesen wird



Fig. 34. Sphagnum cymbifolium mit Früchten. Nach Schimper.

Amphi- und Endothecium in derselben Weise angelegt, wie es oben geschildert wurde. Aber das Archespor geht aus der innersten Schicht des Amphitheciums hervor. Das Archespor (spo) Fig. 35 bildet in der jungen Anlage eine hohle Glocke, die Columella ist infolgedessen nicht in der Lage, das junge Sporogon von oben bis unten zu durchsetzen, sondern sie endigt blind unterhalb, im Innern des Archespors. Die Kapsel hat einen breiten ausgeprägten Fuß, aber keinen Stiel. Der Fuß senkt sich wie üblich in den Scheitel des Moosstämmchens ein. Dieses selber aber hat sich an seiner Spitze zu einem völlig blattlosen Organ, dem Pseudopodium, entwickelt, das man im ersten Augenblick für einen Kapselstiel zu halten geneigt wäre. Der Archegonbauch (Calyptra) wächst lange mit, wird

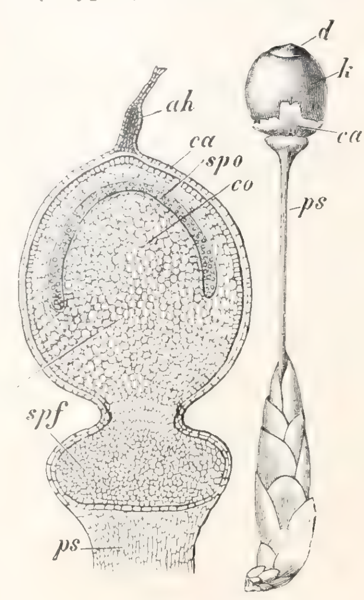


Fig. 35. Sphagnum acutifolium. 1 junges Sporogon im Längsschnitt, ps Pseudopodium, ca Calyptra, ah Archegoniumhals, spf Sporogonfuß, co Columella, spo Sporensack mit Sporen. — 2 Sphagnum squarrosum. reifes Sporogon am Ende eines kleinen Zweiges, ca durchrissene Calyptra, d Deckel, k Kapsel, ps Pseudopodium. Vergr. Nach Schimper.

schließlich an seiner Spitze gesprengt und von der Kapsel durchbrochen, so daß eine Haube fehlt (Fig. 35). Das Archespor wandelt sich später in der üblichen Weise in die Sporen um, und diese liegen nun in einer glockenförmigen Höhlung über der Columella. Die Kapsel besitzt einen Deckel mit ganz flacher Warze. Derselbe löst sich los, ein Peristom aber wird nicht gebildet.

Andreaeales. Diese Gruppe entwickelt wiederum (Fig. 36) das Archespor aus dem Endothecium, wie es für die Bryales geschildert wurde. Aber die Anordnung gleicht derjenigen bei den Sphagnales insofern, als auch hier das Archespor glockenförmig ist und als die Columella von unten her in diese Glocke eindringt (Fig. 36,2). Auch hier wird ein blattloses Pseudopodium gebildet. Der Bauch des Archegoniums wird

regelrecht durch einen Querriß in Vaginula und Haube getrennt (v, Fig. 36). Der Oeffnungsmechanismus ist sehr eigenartig, weil ein Deckel fehlt, und weil in der Kapsel 4 kreuzweis gestellte Längsspalten entstehen (Fig. 36), aus denen die Sporen hervortreten. Das wird dadurch erreicht, daß die ganze Kapsel sich etwas verkürzt und nun die 4 Wandteile nach außen vorwölbt.

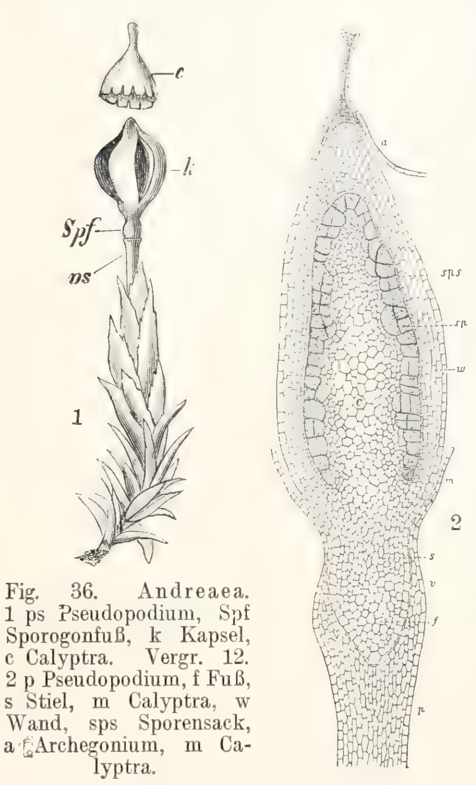


Fig. 36. Andreaea. 1 ps Pseudopodium, Spf Sporogonfuß, k Kapsel, c Calyptra. Vergr. 12. 2 p Pseudopodium, f Fuß, s Stiel, m Calyptra, w Wand, sps Sporensack, a Archegonium, m Calyptra.

9. Systematik. Wir unterscheiden nunmehr 3 Gruppen unter den Laubmoosen:

1. Die Sphagnales. Das Archespor entsteht im Amphithecium, das Endothecium bildet nur die Columella. Archespor glockenförmig, nicht von der Columella durchbrochen. Kapsel mit einem Deckel, aber ohne Peristom; sie durchbricht die Calyptra an der Spitze, sonach fehlt eine Haube. Die Spitze des Moosstämmchens wächst zu einem langen Träger, dem sogenannten Pseudopodium aus, das eine Seta vortäuscht.

Einzige Familie Sphagnaceae, einzige Gattung Sphagnum. Diese Moose sind besonders interessant wegen des Baues ihrer Stämme und Blätter, die wir oben geschildert haben. Sie leben an feuchten Orten in Wäldern und im Gebirg, ganz vorzugsweise aber besiedeln sie die nassen Stellen der Moore, ja sie gehen gelegentlich vollständig ins Wasser hinein. Vielfach bilden sie demnach auch einen wesentlichen Bestandteil des Torfes, sie können sogar die Torfbildung einleiten.

2. Andreaeales. Archespor aus dem Endothecium gebildet; glockenförmig wie bei den Sphagnales. Calyptra zerfällt durch Querriß in Vaginula und Haube. Sporogon auf einem Pseudopodium. Die Kapsel öffnet sich mit vier Längsrissen.

Einzige Familie Andreaeceae, einzige Gattung Andreaea. Kleine Moose, welche in Polstern auf den Felsen der Gebirge reichlich vertreten sind, aber auch auf erratischen Blöcken in der Ebene vorkommen.

3. Bryales. Archespor aus dem Endothecium, tonnenförmig, von der Columella durchsetzt, welche bis an den Deckel der Kapsel reicht. Oberer Teil der Calyptra als Haube emporgehoben. Meistens öffnet sich die Kapsel mit einem apikalen Deckel, meistens besitzt sie an der entstehenden Oeffnung auch ein Peristom. Bei einzelnen, mutmaßlich reduzierten Formen fehlt der Deckel, die Sporen werden durch unregelmäßiges Zerreißen oder Faulen der Kapselwand frei (Cleistocarpi).

Unter den Bryales gibt es Formen, bei denen die „Moospflänzchen" recht wenig entwickelt sind, — ob sehr primitiv oder sehr reduziert, ist schwer zu sagen. Ein gutes Beispiel hierfür ist die Gattung Buxbaumia. Bei der auch in Deutschland vorkommenden Buxbaumia aphylla (Fig. 39) fehlt, wenigstens im männlichen Geschlecht, das Moospflänzchen eigentlich ganz. Das scheint sehr sonderbar, wird aber verständlich, wenn man bedenkt, daß die „Moospflanze" eigentlich nur der Träger der Geschlechtsorgane ist, die selbstverständlich ganz gut auch ohne Vermittelung eines besonderen Tragorganes dem Gametophyten direkt aufsitzen können.

Das Antheridium sitzt bei der männlichen Buxbaumia direkt dem Protonema auf und wird bloß von einem verbreiterten chlorophyllfreien bräunlichen Protonemazweig blattartig umhüllt (Fig. 37). Die männliche Buxbaumiapflanze ist demnach das am einfachsten gebaute Moos, eben nur ein Protonema, dem die Antheridien direkt aufsitzen (Fig. 37, 4). Bei den weiblichen Buxbaumien wird ein wenn auch sehr kleines Moospflänzchen gebildet (Fig. 37, 2).

Solche einfache Formen, von denen man nicht mit Sicherheit sagen kann, ob sie primitiv oder reduziert sind, erschweren die weitere Einteilung der Bryales bedeutend. Aber auch sonst ist es schwer, eine gute Einteilung zu treffen. Die vielfach beliebte Einteilung in Cleistocarpi (mit nicht aufspringenden, sondern verwesenden Kapseln) und Stegocarpi (mit aufspringenden

Kapseln) ist ebensowenig natürlich, wie diejenige in Pleurocarpi (Kapseln an der Spitze von Seitenzweigen) und Acrocarpi (Kapseln am Ende des Hauptsprosses); denn Cleistocarpie ist sicher ebenso wie Cleistogamie bei Phanerogamen zu wiederholten Malen entstanden, und Acrocarpi und Pleurocarpi sind beide acrogyn.

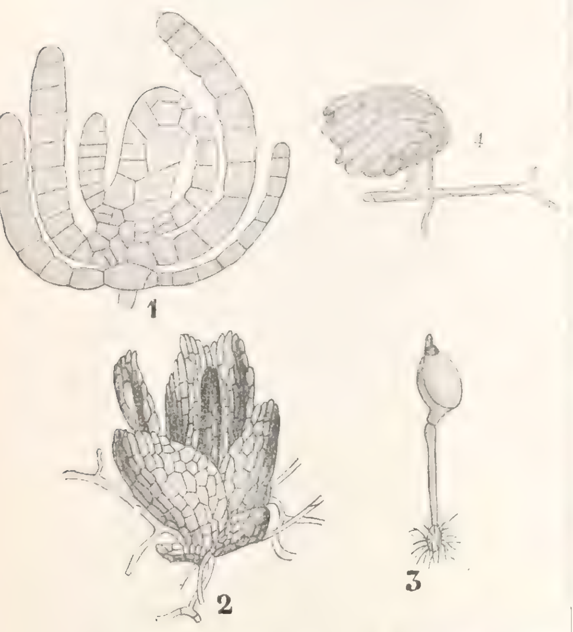


Fig. 37. Buxbaumia. 1 2 Weibliche Pflanze im Längsschnitt resp. von außen. 3 Pflanze mit reifer Kapsel. 4 Männliche Pflanze mit den Hüllblättern um das Antheridium.

Eine, Lotsy's Ansicht nach etwas bessere, jedoch auch nicht einwandfreie Einteilung — man muß dabei Buxbaumia z. B. ausschließen — erhält man, wenn man die Bryales zerlegt in 1. Archidonten, bei denen die Peristomzähne aus ganzen Zellen aufgebaut sind, und 2. Schizodonten, bei denen wie bei Funaria, das Peristom nur aus Zellwandstücken besteht.

Auf die einzelnen Familien der Bryales soll nicht eingegangen werden, einiges ist schon oben erwähnt.

B. Lebermoose.

Die meisten Lebermoose besitzen ein nur wenigzelliges Protonema (Fig. 38). Aus den keimenden Sporen treten recht kurze Zellreihen hervor und verbreitern sich dann rasch zum flachen Thallus oder zum beblätterten Sproß.

Immerhin gibt es Ausnahmen, z. B. besitzen die Protocephalozien ein Protonema, welches so reich verzweigt ist wie das vieler Laubmoose. Die fruktifizierenden Sprosse sind hinfällig, das Protonema ausdauernd; es erinnert dadurch an manche einfache Laubmoose. Bei Metzgeriopsis ist das Protonema zu bandförmigen, verzweigten Körperchen erweitert, das dann seinerseits nur kurze, aber doch mit normalen Blättern versehene Sprosse treibt.

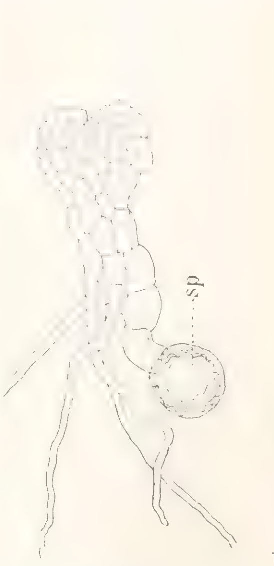


Fig. 38. Protonema von Fimbriaria. Nach Campbell. sp Sporenhaut.



Fig. 39. Elateren, 1 von Fegatella. 2 von Aneura. Nach Karl Müller.

Bei den meisten Lebermoosen finden wir (vgl. oben S. 1050) Elateren. Das sind sterile Zellen, welche zwischen den Sporen regelmäßig oder regellos (s. unten S. 1078 u. 1085) gebildet werden. Sie leiten sich wie die Sporen vom Archespor her. Die Elateren besitzen eine dünne Haut aus Cellulose, dieser sind innen aufgelagert braun gefärbte schraubig gewundene Bänder (Spiren), die nicht aus Cellulose bestehen, vielleicht verkorkt sind. Diese sind in Ein- oder in Mehrzahl vorhanden (Fig. 39). Infolge von Wasserverlust führen die Elateren Bewegungen aus, die möglicherweise bedingt werden durch die Kohäsion der in ihnen verbleibenden Wassersäule (s. den Artikel „Bewegungen der Pflanzen").

Charakteristisch für die meisten Lebermoose sind die Oelkörper derselben. Bei den Jungermanniales u. a. liegen sie in fast allen Zellen der Blätter, bei den Marchantiales pflegen sie in besonderen, meist relativ kleinen Zellen lokalisiert zu sein. Es handelt sich um ein Gemenge ätherischer Oele, die Exkrete darstellen, den Lebermoosen oft einen charakteristischen Geruch verleihen und ihnen wohl Schutz gegen Tierfraß gewähren.

Die Lebermosse sind zumal in ihren Vegetationsorganen weit vielgestaltiger als die Laubmoose. Es lassen sich jedoch aus der Vielgestaltigkeit der Formen vier Haupttypen herausschälen. Das sind:

1. Anthocerotales;
2. Marchantiales;
3. Metzgeriales;
4. Jungermanniales.

Wir behandeln diese vier Gruppen gesondert.

1. Anthocerotales. Die wichtigste Gattung dieser Gruppe ist Anthoceros. Wir finden hier verhältnismäßig große Formen, mit eigentümlichem, tiefgelapptem oder unregelmäßig krausem, dunkelgrünem Thallus (Fig. 40). In den Schleimhöhlen des letzteren sind Fäden von Nostocaceen eingeschlossen.

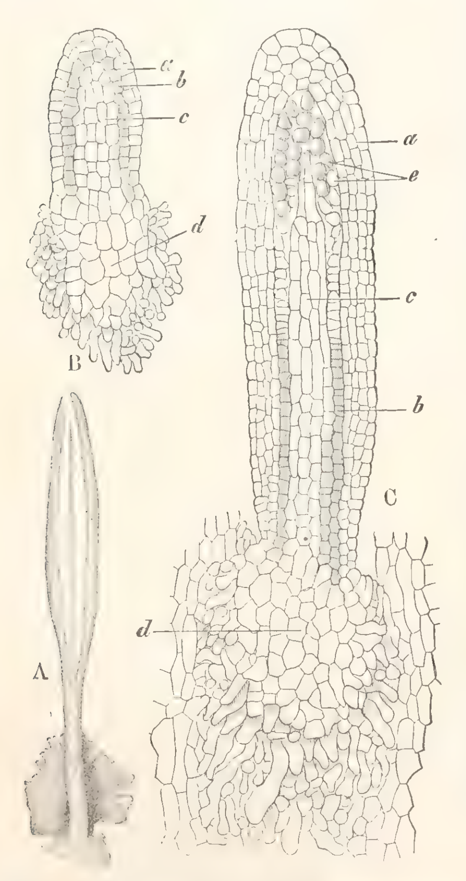


Fig. 40. A Stück des Thallus von Anthoceros mit geöffneter Kapsel. B. Junges Sporogone von Dendroceros. Nach Leitgeb. a Wand, b Arhespor, c Cobunella, d Fuß. C dasselbe, b intercalare Wachstumszone, e Sporen.

Die Zellen des Thallus enthalten Chlorophyllkörner mit Pyrenoiden, die wir sonst nur bei Algen finden. Die Pflänzchen wachsen vorwiegend an lehmigen Stellen. Der Thallus liegt dem Boden an. Im fruktifizierenden Zustande sind sie leicht zu erkennen an ihren langen, dünnen, zylinderförmigen Sporogonen, die sich langsam aus dem Thallus herausschieben (Fig. 40A), und zwar deswegen, weil sie an ihrer Basis eine meristematische Zone besitzen, welche sehr lange tätig ist.

Die Antheridien und die Archegonien sind dem Thallus eingesenkt. Nach der Befruchtung der letzteren wächst die Zygote zunächst zu einem eiförmigen Embryo aus, dieser streckt sich aber sehr rasch zu einem fast nadelartigen Gebilde. Und nun sehen wir auch bald, daß sich in ihm eine Columella differenziert, welche vom Archespor glockenförmig überdeckt wird (Fig. 40), wie bei Sphagnaceae und Andreaceae. Das Sporogon greift sehr bald mit einem Fuß in den Thallus ein (Fig. 40B) und verankert sich in diesem mit Hilfe von Fortsätzen (Fig. 40). Unmittelbar über dem Fuß tritt dann auf etwas älteren Stufen (etwa bei Fig. 40b) die oben erwähnte meristematische Zone auf und baut von unten her immer neue Elemente an das ursprünglich noch ziemlich kurze Sporogonium an. Die Folge dieses Wachstums ist, daß an der Spitze der Kapsel die Sporen fertig gebildet sind, wenn in den unteren Regionen noch kaum die Teilungen des Archespors begonnen haben. Endlich aber werden überall die Sporen fertiggestellt und dann reißt das Sporogonium mit zwei Rissen der Länge nach auf. Zwischen den beiden so entstehenden Klappen ragt (Fig. 40A) die Columella hervor und nun erkennt man besonders deutlich neben den Sporen sterile Zellen, die Elateren (Fig. 41).



Fig. 41. Querschnitt durch das Sporogon von Anthoceros.

Die Kapsel besitzt Spaltöffnungen, was sonst bei Lebermoosen nicht vorkommt.

Manche Anthoceros-Arten bilden Knöllchen als Ruhestadien. Anthoceros dichotomus bildet auf der Bauchseite Sprosse,

welche in den Boden dringen und in ihren Enden aufschwellen. Die so entstandenen Knollen führen Reservestoffe und sind von korkähnlichen Zellen umgeben. Bei Anthoceros argentinus werden abwärts gebogene Randlappen zu Knollen.

2. **Marchantiales.** Diese Gruppe ist recht groß und umfaßt die drei Familien der Ricciaceae, Sphaerocarpaceae und Marchantiaceae.

Wir wollen zunächst die Ricciaceae mit der Gattung Riccia selber betrachten. Manche Arten wachsen auf feuchten Stellen, z. B. auf Lehmäckern usw., andere auf oder im Wasser schwimmend oder in demselben untergetaucht. Manche Arten können Land- und Wasserformen bilden. Der Thallus (Gametophyt) ist ziemlich kompliziert gebaut. Betrachten wir z. B. einen Querschnitt von Riccia glauca, so sehen wir an der Unterseite ein parenchymatisches Gewebe, das farblos ist und viel Stärke gespeichert hat. Dieses entsendet nach unten Rhizoiden und flache Zellflächen, die sogenannten Bauchschuppen. Von dem farblosen, basalen Gewebe streben chlorophyllreiche Fäden empor, ohne dicht aneinander zu schließen; nur die farblosen Endzellen berühren sich und bilden zusammen eine locker gefügte epidermisartige Schicht (Fig. 42,2). Bei anderen Arten werden keine Zellfäden, sondern Zellplatten gebildet, so daß

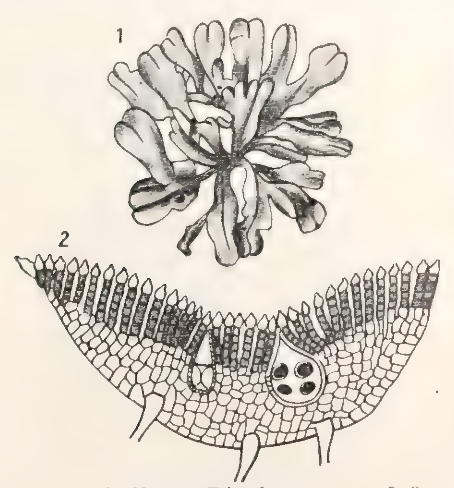


Fig. 42. 1 Thallus v. Riccia natans. 2 Querschnitt des Thallus von Riccia spec. Nach Lotsy.

die Oberfläche grubig wird und wieder bei anderen entstehen große, geschlossene Luftkammern, indem die oberste Zelle der vertikalen Zellplatte sich radiär teilt und so die Grube überwölbt.

Die Sprosse wachsen mit einer Scheitelzelle (x, Fig. 43), welche zunächst nach rechts und links Segmente abgliedert, außerdem aber auch durch nach unten gekehrte Segmente farbloses Gewebe mit den Bauchschuppen, nach oben aber grünes Gewebe mit den Geschlechtsorganen (ar) bildet.



Fig. 43. Längsschnitt durch die wachsende Thallusspitze von Riccia Nach Campbell. x Scheitelzelle, ar Archegonium, l Bauchschuppen.

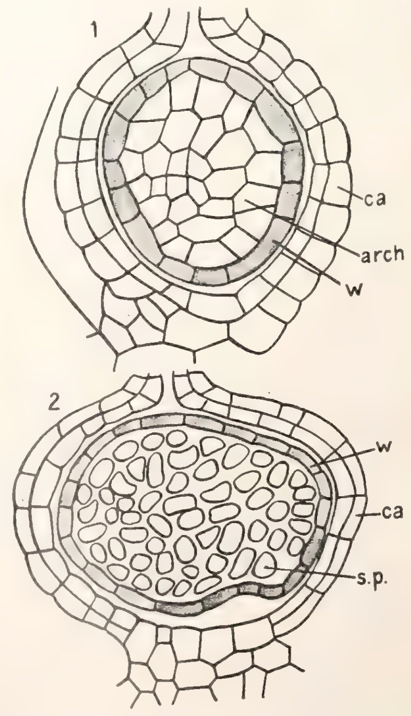


Fig. 44. Längsschnitte durch ein junges (1) und ein älteres Sporogon (2) von Riccia. Nach Lotsy. ca Calyptra, w Wand, arch Archespor, sp Sporen.

Diese letzteren werden zwischen das grüne Gewebe eingesenkt.

Die Zygote teilt sich in eine Anzahl Zellen, welche zunächst gleichwertig erscheinen. Später aber wird eine einzige periphere Schicht derselben (Fig. 44) zur Wandung des Sporogoniums, während alle inneren Zellen das Archespor darstellen. Aus diesen werden dann (Fig. 44,2) die Sporen gebildet. Sie werden frei durch unregelmäßigen Zerfall der Kapsel.

Auf Grund dieser einfachen Struktur des Sporogons ist Riccia an den Anfang der Lebermoosreihe, ja auch der Klasse der Moose überhaupt gestellt worden. Allein der relativ komplizierte Bau des Gametophyten hat auch wieder Bedenken hervorgerufen.

Dieser ist nun wiederum außerordentlich einfach bei den Sphaerocarpaceae. Bei Sphaerocarpus finden wir einen einfachen Thallus mit mehreren Zelllagen in der Mitte und einer einfachen Zellschicht am Rande. Die Antheridien (Fig. 45) sind dem Thallus einfach aufgesetzt, ebenso die Archegonien. Beide Organe sind von einer besonderen Hülle umschlossen, die bei den Archegonien nach der Befruchtung außerordentlich erweitert wird und dadurch dem Pflänzchen ein eigenartiges Aussehen verleiht. Die Zygote wächst zu einem Sporogon aus, welches die Calyptra an ihrer Spitze sprengt und mit einem Fuß in die Mutterpflanze eindringt (Fig. 45C). Die Kapsel selber hat eine einschichtige Wand, der ganze Inhalt wird zur Sporenbildung verwendet (Fig. 45C). Die Stellung des Sphaerocarpus unter dem Marchantiales ist nicht unumstritten. Sie wird vielfach als eine primitive Jungermanniacee angesprochen.

Und dasselbe gilt von der Gattung Riella. Das ist eine mit Vorliebe in größeren Seen untergetaucht lebende Lebermoosgattung. Der Thallus derselben verbreitert sich einseitig zu einem Flügel, und dieser kann bei manchen Formen wendeltreppenartig gewunden sein. Ueber weiteres s. Goebel, Lotsy u. a. Das Sporogon ist dem von Sphaerocarpus sehr ähnlich.

Die Marchantiaceae sind weitaus die größte Familie in unserer Gruppe. Sie zeigt die weitestgehende Differenzierung des Thallus. Der ausgeprägteste Typus in ihr ist die Gattung Marchantia. Diese wollen wir zunächst behandeln, weil sie die bestbekannte, ist. Die Thalluslappen sind gabelig verzweigt und liegen dem Boden an. An der Unterseite derselben finden sich ganz regelmäßig angeordnet einschichtige Bauchschuppen und neben diesen Rhizoiden, welche die Pflanze am Substrat festhalten. Wir unterscheiden glatte und Zäpfchenrhizoiden. Letztere sind solche, bei welchen mehr oder minder unregelmäßige Cellulosezapfen von der Wand aus in den Zellraum eindringen. Wie bei vielen Riccien finden wir auch hier auf der Unterseite ein annähernd farbloses Parenchymgewebe (Fig. 46) und auf der Oberseite Luftkammern, die indes viel komplizierter gebaut sind als bei der obigen Gattung. Ihre Umrisse sind schon an der Felderung des Thallus erkennbar (Fig. 48). Die Felder sind rhomboidisch, in der Mitte eines jeden Feldes befindet sich eine Atemöffnung, die von mehreren Stockwerken ringförmig angeordneter Zellen umgeben ist (Fig. 46B). Die Wände der Luftkammern wie auch deren Decke sind fast farblos (Fig. 46B). Auf ihrem Boden aber

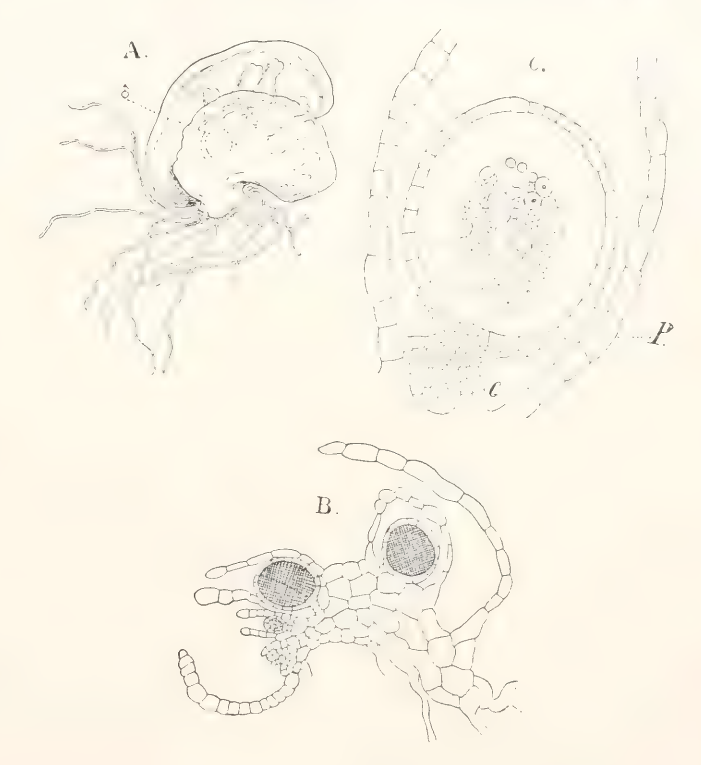


Fig. 45. Sphaerocarpus terrestris n. Göbel u. Campbell. A männliche Pflanze von der Seite, ♂ Antheridien. B männliche Planze im Längsschnitt. C Längsschnitt durch ein Sporgon. c Calyptra. P Perigon. Nach Göbel und Campbell.

entspringen zahlreiche, chlorophyllhaltige, gegliederte und verzweigte Zellfäden (chl), welche als Assimilatoren fungieren. Die Thalluslappen wachsen mit einer zweischneidigen Scheitelzelle, durch deren Längsteilung wird auch die Gabelung der Sprosse eingeleitet.

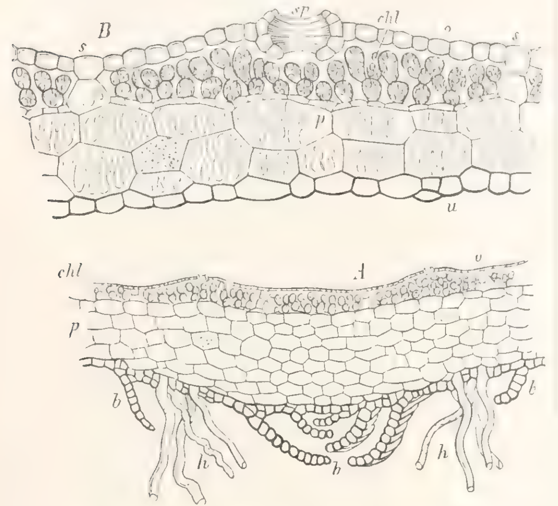


Fig. 46. Querschnitt durch den Thallus v. Marchantia. Nach Sachs. A mittlere Partie a. d. Unterseite mit d. Schuppen b u. Rhizoiden h. B Randpartie des Thallus, stärker vergr. p farbloses, netzartig verdicktes Parenchym. o Epidermis. chl chlorophyllhaltige Zellen. sp Spaltöffnungen. s Scheidewände zw. d. Luftkammern. u untere Rindenschicht mit den dunkel gefärbten Zellwänden.

Die Geschlechtsorgane stehen (Fig. 48 und 50) auf schirmförmigen Trägern, welche sich auf ziemlich langen Stielen über dem Thallus erheben. Diese Fruchtträger (Receptacula, Carpocephala) sind modifizierte Thalluslappen. Schon auf ganz jungen Stadien krümmt sich ein solcher aufwärts, etwa so wie das in Fig. 47 angegeben ist. Man kann an seiner Basis oben noch die grünen Gewebe, unten die Rhizoiden erkennen. Und auch späterhin, wenn der Stiel sich gestreckt hat, kann man an ihm zwei Rinnen erkennen, welche Rhizoiden in größerer Zahl einschließen; ein augenfälliges Zeugnis dafür, daß dieser Stiel nichts anderes ist, als ein eingerollter Zweig des Laubes.

Der Scheitel des Fruchtträgers verbreitert sich schon sehr früh und entwickelt die Sexualorgane auf seiner Oberseite (Fig. 47). Diese Stellung behalten die Antheridien auf ihren Trägern dauernd bei; sie werden zunächst oberflächlich angelegt, dann aber durch die umliegenden Gewebe umwallt. So lassen denn die gelappten Antheridienstände im erwachsenen Zustande auf ihrer Oberseite (Fig. 48) eine größere Zahl von Punkten erkennen, das sind die Oeffnungen der Höhlungen, in welchen die Antheridien

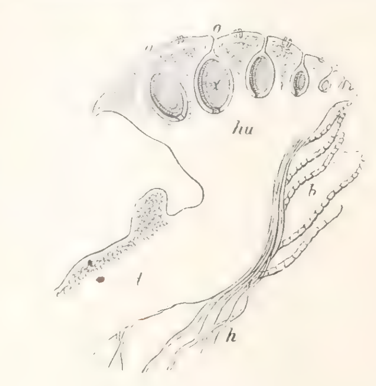


Fig. 47. Längsschnitt durch einen jungen Antheridienstand (hu) von Marchantia. Nach Sachs. t Thallus, h Haare, b Bauchschuppen, α Antheridien.

in Form von eiförmigen, kurz gestielten Körpern (Fig. 48) sitzen. Die Antheridien in der Mitte des Receptaculums sind die

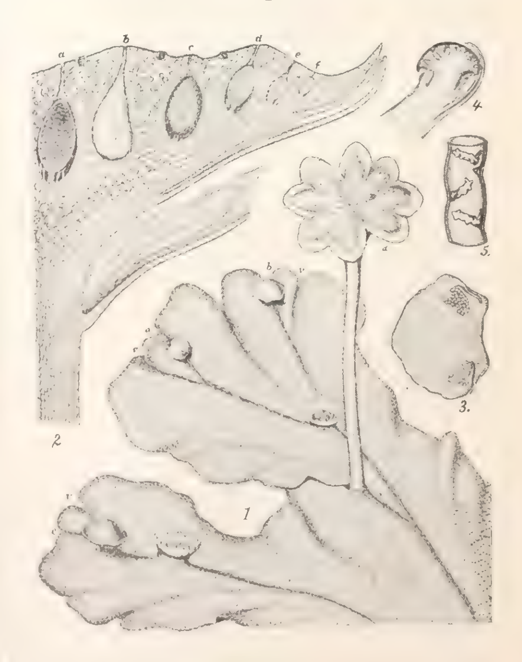


Fig. 48. Männl. Pflanze von Marchantia. Nach Kny. 1 Thallus mit Brutbechern und Antheridienständen (a, b, d) in verschiedenem Alter. v Vegetationspunkte. 2 Stück eines Längsschnittes durch den Antheridienstand, a—f Höhlungen mit den Antheridien. 3 Querschnitt durch den Stiel. 4 junges Receptakulum. 5 Zapfenrhizoid.

ältesten. Ueber ihren Bau im einzelnen vgl. den Artikel „Fortpflanzung der Pflanzen".

Die Archegonien stehen, wie die Antheridien, zunächst auf der Oberseite ihres hutförmigen Receptaculums. Bei weiterem Wachstum des Hutes aber werden sie auf die Unterseite desselben verschoben und dort in eigenartiger Weise angeordnet (Fig. 49). Die weit vortretenden Strahlen des Schirmes sind wieder nichts anderes als eingerollte Thalluslappen, sie sind steril. Die Archegonien sitzen in radiär gestellten Gruppen (2 bis 3 Reihen) zwischen denselben, und wir verschaffen uns den Anblick einer solchen, wenn wir einen radialen Längsschnitt durch das Receptaculum führen, welcher genau zwischen zwei Schirmstrahlen hindurchgeht (Fig. 49). Dann ergibt sich, daß die dem Stiel zugekehrten Archegonien die jüngsten sind.

Fig. 49. A Längsschnitt durch ein Stück eines Archegonienstandes von Marchantia. Nach Kny. a Archegonien, pe Perichaetium, st Stiel. B Perichaetium pe, mit Archegonien a. Nach Sachs.

Jede Archegonien-Gruppe wird von einem einschichtigen, am Rande gefransten und gelappten Mantel umgeben, der nach unten offen ist — Perichaetium — (Fig. 49B, pe). Jedes Archegonium trägt an seiner Basis einen Ringwall. Bis zur Geschlechtsreife der Archegonien ist der Stiel des weiblichen Receptaculums so kurz, daß der Kopf dem Thallus aufsitzt (Fig. 50). In diesem Stadium dringen die durch Tau oder Regen übertragenen Spermatozoiden zwischen den Schirmstrahlen hindurch zu den Archegonien vor und befruchten die Eizelle.

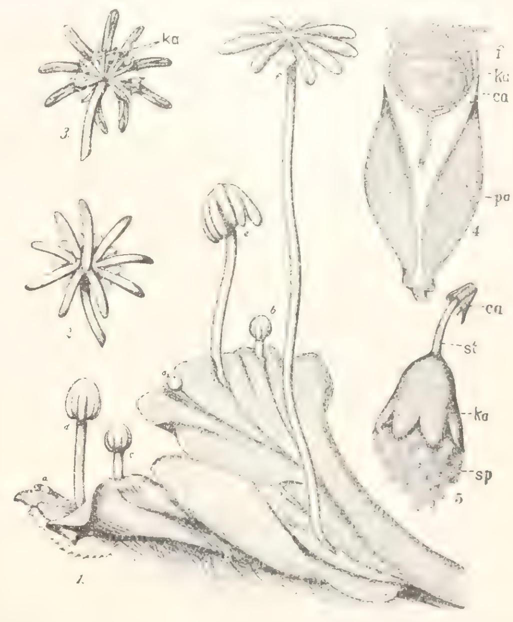


Fig. 50. Weibl. Pflanzen von Marchantia. Nach Kny. 1 Thallus mit verschieden alten (a—f) Receptakeln. 2 Receptakulum von oben, 3 von unten, ka Kapseln. 4 Halbreife Kapsel ka mit Fuß f, Calyptra ca u. Perianth pe. 5 Geöffnete Kapsel ka, sp Sporen, st Stiel, ca Calyptra.

Nach der Befruchtung wächst der eben erwähnte Ringwall an der Basis des Archegons zu einer bauchigen Hülle (Fig. 50, 4pa), dem Perianth, aus. Die Zygote wird zum Sporogon, an dem man Fuß und Kapsel ebenso leicht unterscheidet (Fig. 50, 4f, ka) wie die umhüllende Calyptra (ca). Bei der Reife streckt sich der Stiel des Sporogons (st), die Kapsel durchbricht die Calyptra an der Spitze und schaut nun zwischen den Perichaetialblättern hervor (ka). Dann öffnet sie sich am Scheitel mit einer Anzahl von Zähnen, um Sporen und Elateren zu entlassen.

Neben dieser geschlechtlichen Fortpflanzung existiert bei Marchantia noch eine ungeschlechtliche. Der Thallus trägt (Fig. 48, 1)

auf den Mittelrippen becherförmige Gebilde von annähernd kreisrundem Querschnitt, die von einer gezackten oder gezähnten Hülle umgeben sind. Auf dem Boden dieser Becherchen erheben sich auf einzelligem Stiel vielzellige Brutknospen. Sobald dieselben voll entwickelt sind, lösen sie sich los, und man erkennt nun, daß sie am Rande einschichtig, in der Mitte aber aus etwa 4 Zelllagen aufgebaut sind (Fig. 51, 1). Von oben her erkennt man an den beiden Flanken (Fig. 51, 2) ziemlich tiefe Einschnürungen. Am Grunde derselben liegt je ein Vegetationspunkt, und wenn nun die Brutknospen auf ein ge- es ab, auf welcher Seite später das grüne und auf welcher das farblose Gewebe der Marchantia gebildet werden soll.

Brutknospen kommen außer bei Marchantia meines Wissens nur noch bei Lunularia vor, hier sind die Brutbecherchen halbmondförmig. Die bei uns aus dem Süden besonders in die Gewächshäuser eingeschleppte Pflanze ist nur in weiblichen Exemplaren zugegen, die sich freilich durch jene Brutkörper massenhaft vermehren.

Eine vegetative Vermehrung erfolgt fast bei allen Gattungen durch Verfaulen der ältesten Partien; so werden, wie bei den

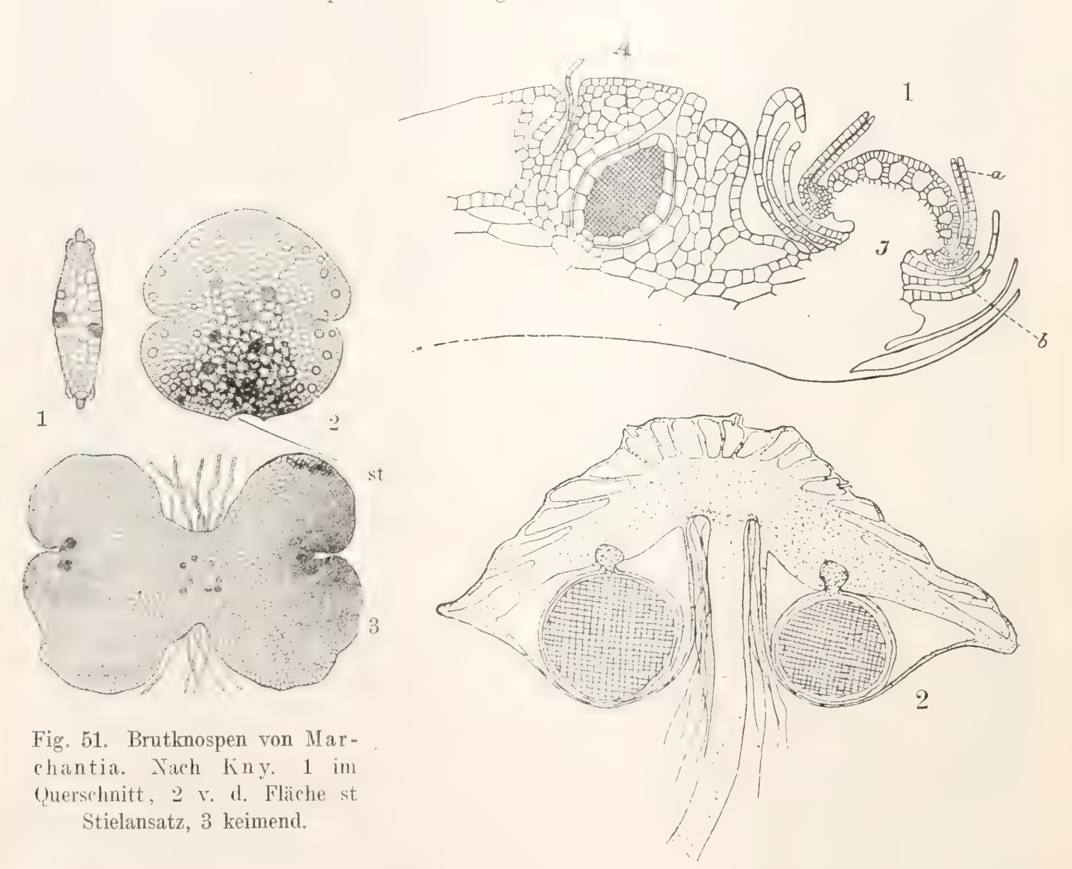


Fig. 51. Brutknospen von Marchantia. Nach Kny. 1 im Querschnitt, 2 v. d. Fläche st Stielansatz, 3 keimend.

Fig. 52. Reboulia hemisphaerica. Nach Karl Müller u. Hofmeister. 1 Längsschnitt des Thallus mit eingesenktem Antheridium A und jungem Receptakulum J. a Archegonien. b Schuppen. 2 Längsschnitt des Receptakulums mit 2 Sporogonen.

eignetes Substrat gelangen, werden von jenen aus nach 2 Richtungen hin neue Sprosse gebildet (Fig. 51, 3), während die ersten Rhizoiden in einer Ebene entstehen (Fig. 51, 3), die ungefähr mit der Ebene zusammenfällt, in welcher die Brutknospe dem Stiel aufsaß. Die Brutknospen sind auf beiden Seiten völlig gleich; vom Lichte hängt Laubmoosen, die einzelnen Aeste selbständig. Zerstückelung des Thallus auf irgendeine Weise bedingt Regeneration — auch aus recht kleinen Partien. Adventivsprosse und ähnliches können auch aus den Stielen der Receptacula hervorgehen. Fegatella conica bildet Knollen an seiner Bauchseite.

Die Gattung Marchantia ist der höchst-

entwickelte Typus in dieser Reihe der Lebermoose. Wir finden aber in derselben Gruppe auch etwas einfachere Formen, welche eine Anknüpfung an die Riccien wohl gestatten mögen. Zunächst erwähnen wir die Gattung Reboulia. Hier sind die Antheridien direkt in den Thallus eingesenkt (Fig. 52,1), stehen also nicht auf einem besonderen Träger. Die Archegonien dagegen (Fig. 52) werden wie bei Marchantia auf einem Receptaculum emporgehoben. Doch ist die Zahl der Archegonien eine beschränkte, es finden sich deren nur 4 und demgemäß werden auch nur 4 Sporogone gebildet (Fig. 52).

Bei Reboulia ist das Receptaculum, wie ohne weiteres aus der Figur 52 ersichtlich, genau wie bei Marchantia ein modifizierter Thalluslappen. Das ist nun anders bei



Fig. 53. Clevea hyalina, Thallus mit dorsalem Fruchtsproß. Nach Karl Müller (Janzen).

Clevea (Fig. 53). Hier entspringt das Receptaculum mitten auf dem Rücken des Thallus, und die Entwickelungsgeschichte belehrt uns darüber, daß zunächst in einer schwachen Vertiefung (Fig. 54) eine Wucherung entsteht, an welcher sich die Archegonien bilden. Diese streckt sich nachher zum Archegonienträger, welcher in Figur 53 abgebildet ist.

Besonders einfach erscheint die Gattung Corsinia. Hier wird überhaupt kein Receptaculum gebildet, vielmehr sitzen die Geschlechtsorgane (Fig. 55) in Vertiefungen des Thallus zu mehreren beisammen und sind dann um eine Vorwölbung gruppiert, welche sich mitten in jener Grube erhebt



Fig. 54. Clevea hyalina. Nach Leitgeb. Längsschnitt des Thallus, v Vegetationspunkt, . junges weibliches Receptakulum.

(Fig. 55). Diese Grube mag man als die erste Andeutung eines Receptaculums betrachten von der Form, wie wir es bei Clevea geschildert haben, und deswegen wird man Corsinia an den Anfang der Marchantien-

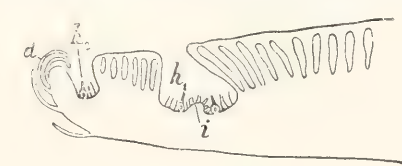


Fig. 55. Längsschnitt durch den Thallus von Corsinia. Nach Leitgeb. d Schuppen, h_1 h_2 Höhlungen mit den Archegonienständen, i Höcker inmitten der letzteren.

Reihe stellen können und in ihr das Verbindungsglied mit den Riccien sehen.

Es gibt aber noch eine Form von ähnlicher Einfachheit, das ist Targionia. Bei dieser Pflanze sitzen die Geschlechtsorgane am Rande des Thallus (Fig. 56). Anfänglich

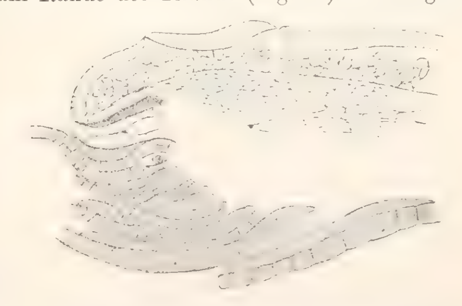


Fig. 56. Längsschnitt durch den Thallus von Targionia. Nach Leitgeb.

auf der Oberseite desselben orientiert, werden sie später an den Rand oder gar auf die Unterseite geschoben und entwickeln hier

ihre Sporogone ohne einen Stiel oder irgend etwas Aehnliches zu bilden. Möglicherweise sind solche Formen der Ausgangspunkt für diejenigen Marchantien geworden, bei denen das Receptaculum einen Thalluslappen darstellt. Freilich ist es kaum möglich, nach der Art der Receptaculumbildung die Einteilung der Marchantien zu treffen, vielmehr wird diese gewöhnlich auf das Verhalten der Kapsel gegründet. Doch erscheint es nicht notwendig, hier darauf einzugehen.

scharf ausgeprägt sind; in solchen Fällen sind dann, wie bei Riccia, die Kammerwände selber grün gefärbt und zur Assimilation befähigt.

3. **Metzgeriales.** Die Gruppe führt vielfach den Namen Jungermanniales anacrogynae. Sie steht zu den Acrogynae (siehe unten) in naher Beziehung, unterscheidet sich aber von ihr dadurch, daß die Scheitelzellen der fertilen Sprosse niemals zur Bildung von Archegonien oder Antheridien aufgebraucht werden. Die

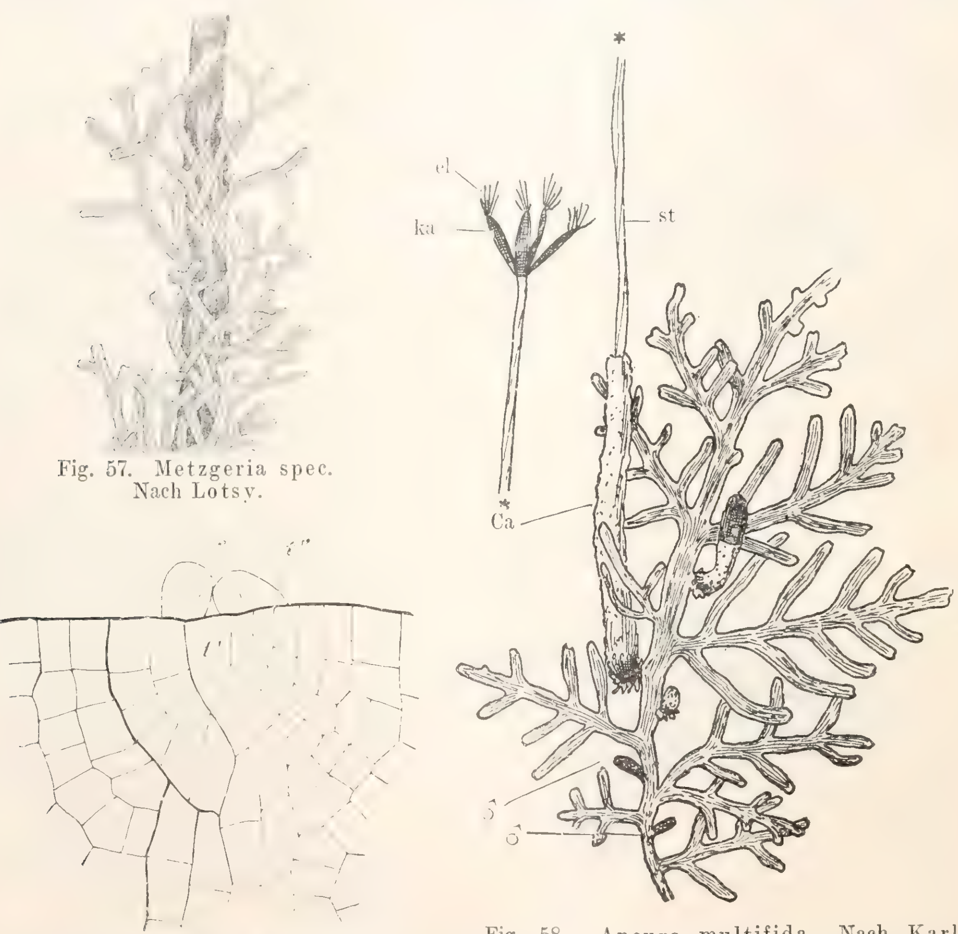


Fig. 57. Metzgeria spec. Nach Lotsy.

Fig. 59. Verzweigung von Metzgeria furcata. Nach Strasburger. c Schleimhaare, t′ alte, t″ neue Scheitelzelle. Stark vergrößert.

Fig. 58. Aneura multifida. Nach Karl Müller. ♂ männl. Zweiglein, ca Calyptra, st Stiel, ka Kapselwand, el Elateren.

Erwähnt sei noch, daß der Thallusbau bei allen Marchantiaceen demjenigen von Marchantia ähnlich ist, daß aber auch Vereinfachungen insofern vorkommen, als die Spaltöffnungen der Marchantia durch einfache Poren ersetzt sind und als auch die Kammern mehrfach der assimilierenden Fäden entbehren, welche bei Marchantia so

Sexualorgane stehen also immer seitlich an ihren Tragsprossen. Die Metzgeriales schließen wohl an die Sphaerocarpaceen an, die ja ohnehin vielfach in diese Gruppe gezählt werden. Wir unterscheiden:

A. Dorsiventral thallöse Formen und rechnen zu diesen die Metzgerioideen und Codonoideen;

B. Radiäre beblätterte Formen, die Haplomitroideae.

Wir beginnen mit den Metzgeroideen, und zwar behandeln wir die Gattungen Aneura und Metzgeria. Metzgeria bildet (Fig. 57) ziemlich schmale, gabelig verzweigte Bänder; diese besitzen eine aus mehreren Zellen aufgebaute Mittelrippe. Der eigentliche Thallus ist einschichtig.

Aneura besitzt recht einfache, bald unregelmäßig, bald fast fiederig verzweigte Thallome (Fig. 58), an welchen nicht selten eine Arbeitsteilung derart bemerkt wird, daß man eventuell von Rhizomen, Wurzeln usw. sprechen kann. Der Querschnitt des Thallus ergibt mehrere Lagen von Zellen, welche alle grün gefärbt sind, und untereinander keine nennenswerte Differenzierung aufweisen.

Die Pflänzchen wachsen mit einer zweischneidigen Scheitelzelle (Fig. 59t′), von welcher auch die Verzweigung ausgeht. Es bildet sich dann z. B. bei Metzgeria in dem zuletzt von der Hauptscheitelzelle abgegliederten Segment durch schräg gestellte Wände sofort eine neue Scheitelzelle (Fig. 59t″). Die Geschlechtsorgane entstehen meist an besonders geformte Sexualsprosse, von denen zumal die weiblichen augenfällig eingekrümmt sind, offenbar zwecks Umhüllung der Archegonien.

Bei Aneura sind wiederum besonders die weiblichen Sprosse eigenartig umgewandelt, sie tragen mehrere Archegonien. Mögen aber diese Sexualsprosse gestaltet sein, wie sie wollen, immer entstehen die Antheridien und Archegonien aus den von der Scheitelzelle abgesonderten Segmenten. Diese selber wird aber niemals mitverbraucht, wie das aus Figur 61 ohne weiteres ersichtlich ist.

Nach der Befruchtung pflegt sich auf jedem Fruchtast nur ein Archegonium weiter zu entwickeln. Die Calyptra wird meistens außerordentlich groß und bauchig, vielfach auch derb und fleischig (Fig. 58). Sie tritt deswegen sofort in die Erscheinung, und das um so mehr, als sie von anderweitigen Hüllen bei unserer Gattung nicht umgeben ist. Sind die Sporogone innerhalb der Calyptra bis zur Reife entwickelt, dann durchbricht die Kapsel den Scheitel der Calyptra und wird auf langem, meist zartem Stiel hoch emporgehoben. Alsdann öffnet sie sich mit



Fig. 60. Symphyogyne sp. Nach Goebel. 2mal vergrößert

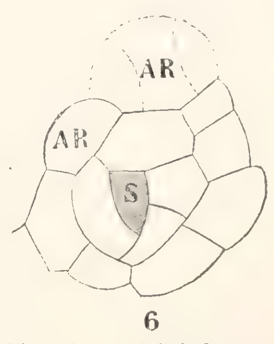


Fig. 61. Scheitel von Aneura. Nach Campbell, von oben. s Scheitelzelle, ar Archegon-Anlagen.

Die weitestgehende Differenzierung in dieser Gruppe dürfte u. a. Symphyogyne aufweisen (Fig. 60), hier findet man gerundete Rhizome, von welchen sich dann verbreiterte, gabelig verzweigte, assimilierende Sporen erheben. Diese können ihrerseits an der Basis, gelegentlich sogar an der Spitze neue Rhizome bilden.

Die Antheridien und Archegonien stehen vielfach getrennt auf besonderen Pflanzen. Nicht selten aber sind sie, z. B. bei Aneura multifida (Fig. 58) auf der gleichen Pflanze vereinigt.

Bei Metzgeria entstehen auf der Bauchseite seitlich an der Mittelrippe be-vier Klappen, um die Sporen zu entlassen. An den Spitzen der vier Klappen erblickt man schon mit bloßem Auge fransenähnliche Gebilde. Diese geben sich bei etwas stärkerer Vergrößerung als Elateren zu erkennen, die den Kapseln an der Spitze angeheftet sind.

Um dies zu verstehen, greifen wir zurück auf die Entwickelungsgeschichte des Sporogoniums. Diese verläuft anders als bei den Laubmoosen und auch anders als bei den Marchantien. Die Zygote teilt sich wie üblich zunächst durch eine Querwand. Die nunmehr entstehende Basalzelle trägt zum Aufbau des Sporogoniums nichts bei. Aus der oberen Zelle

allein gehen die Kapsel, wie der Stiel des Sporogoniums hervor. Die Basalzelle bleibt immer nur als ein Anhang an den letzteren erhalten. Die obere Zelle wird durch einige Querwände (Fig. 63, 3) zerlegt, und dann werden durch perikline Wände innere Zellen von den zukünftigen Wandzellen geschieden.

Zunächst werden nur vier innere Zellen gebildet und von diesen wird die oberste, in Figur 63, 3 schraffierte, bei einigen wenigen Lebermoosen (s. unten) allein zum Archespor. Bei Aneura und bei den meisten anderen Formen werden auch die darunter liegenden Etagen für die Bildung der gesamten Kapsel mitbenutzt. Und erst die weiter unten liegenden Zellen werden zum Stiel. Späterhin wird dann durch weitere Teilung die Wand mehrschichtig (Fig. 62, 2), und die von ihr eingeschlossenen Zellen werden durch vielfache Teilung zunächst in eine Anzahl völlig gleichartiger Zellen zerlegt. Sehr bald aber macht sich in den inneren Zellen eine Differenzierung bemerkbar. Die gegen die Basis gekehrten — in der Figur 62, 2 dunkelgehalten — erhalten reicheren Plasmainhalt, sie stellen das fertile Zellgewebe dar, aus welchem später die Sporen und Elateren hervorgehen. Die oberen, hell gehaltenen Zellen, bilden ein Gewebe, das mit den Elateren (Fig. 62, 3) in Verbindung steht und als Elaterenträger bezeichnet wird. Wenn dann die Kapselwand auf ihrem Scheitel durch vier senkrecht aufeinander gestellte Längsrisse zerfällt, wird auch der Elaterenträger in vier Teile zerlegt und reißt beim Oeffnen die Elateren mit. Diese wieder nehmen die Sporen mit und sorgen für deren Ausstreuung, indem sie dieselben fortschleudern. Das geht sehr rasch, fünf Minuten nach Oeffnung der Kapsel sind nur noch die Elaterenträger mit wenigen Elateren übrig.

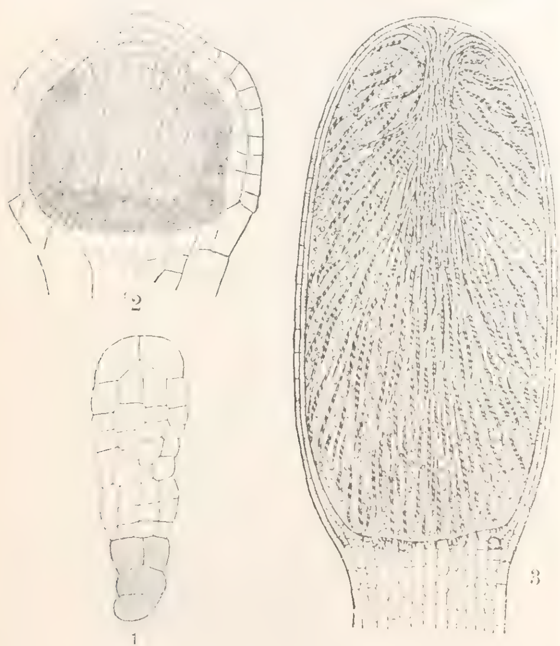


Fig. 62. Sporogone von Aneura. Nach Goebel und Leitgeb. 1 ganz jung. 2 jünger, das sporenbildende Gewebe dunkel, das elaterenbildende (Elaterenträger) hell. 3 älter. Am Scheitel der Elaterenträger, von ihm ausstrahlend die Elateren. Sporen dazwischen.

Aus der Gruppe der Codonoideae erwähnen wir zunächst die Gattung Pellia (Fig. 63). Dieselbe bildet einen einfachen breit gelappten Thallus, ohne wesentliche Gewebedifferenzierung, aber mit einer Mittelrippe.

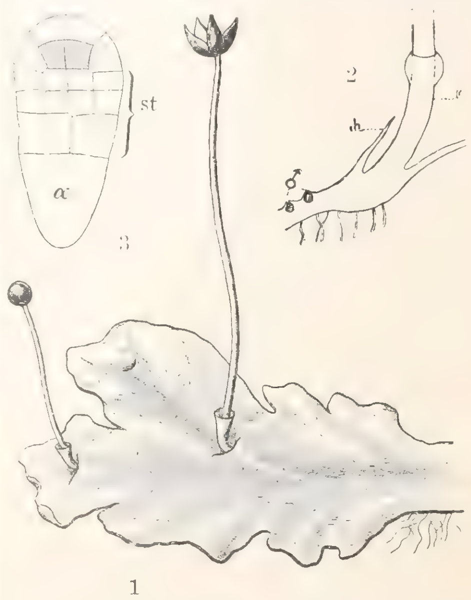


Fig. 63. Pellia epiphylla. Nach Giesenhagen und Karl Müller. 1 ganze Pflanze. 2 Schnitt durch den Thallus. ♂ Antheridien, h „Tasche", k Calyptra. 3 Junges Sporogon. Archespor schraffiert, st zukünftiger Stiel, α sterile Zelle.

Die Antheridien sitzen in Höhlungen zu mehreren beisammen (Fig. 63, 2). Diese Höhlungen sind über die Mitte des Thallus zerstreut. Die Archegonien sitzen zu mehreren in einer Art Tasche, welche durch einen kleinen, dieselbe überwuchernden Thalluslappen gebildet wird (Fig. 63, 2). Nur ein Archegonium wird weiter entwickelt. Die Calyptra streckt sich erheblich und schaut bei Pellia epiphylla aus der Tasche hervor, schließlich durchbricht das Sporogon dieselbe und hebt seine Kapsel auf langem Stiel empor. Die Calyptra ist dann an dessen Basis (Fig. 63, 1) immer noch sichtbar.

Die Kapsel öffnet sich wiederum vier-

klappig, aber die Elateren finden sich hier an einem Elaterenträger, welcher der Basis der Kapsel angewachsen ist (Fig. 64). An diesem Elaterenträger hängen die Elateren noch sehr lange und in diesem Falle handelt es sich offenbar um eine Vorkehrung zu relativ langsamer Annäherung der Sporen, diese werden offensichtlich lange in dem Faserpelz festgehalten.

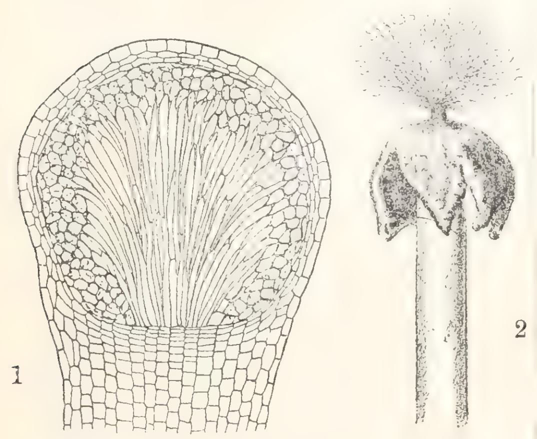


Fig. 64. Pellia. Nach Goebel. 1 junges Sporogon, in der Mitte Elateren, an der Peripherie das Archespor. 2 Kapsel geöffnet.

Die Entwickelung des Sporogons von Pellia unterscheidet sich von derjenigen von Aneura dadurch, daß hier das fertile Gewebe am oberen Ende eine Glocke bildet, die nur aus den vier obersten Zellen im Innern des jungen Embryo hervorgeht (Fig. 63, 3, schraffiert).

An Pellia schließt sich Blasia, deren Sprosse von der Seite her bis auf die Mittelrippe gelappt erscheinen (Fig. 65), so daß

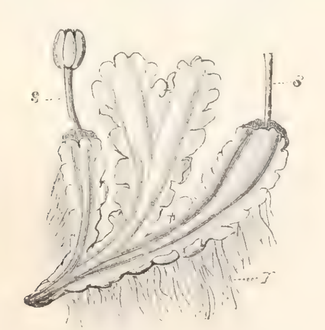


Fig. 65. Blasia (Lehrb.). s Stiel der Kapsel. r Rhizoiden.

eine entfernte Aehnlichkeit mit einer beblätterten Achse entsteht. Blasia ist auffallend dadurch, daß die Archegonien, welche am vorderen Rande des Thallus dicht hinter dem Sproßscheitel stehen, durch Thalluslappen umhüllt werden. Diese Lappen, vor der Befruchtung schwach entwickelt, schließen um das eine weiter entwickelte Archegon (Fig. 66) vollkommen fest zusammen, so daß nunmehr das heranreifende Sporogonium von zwei Hüllen, von denen die Calyptra die innere ist, umgeben

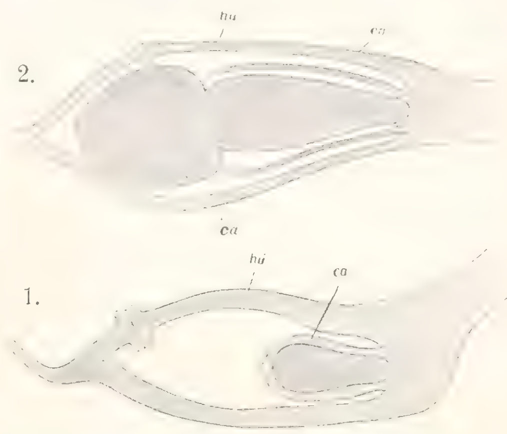


Fig. 66. Blasia. Längsschnitte durch den fruktifizierenden Thallusrand. 1 jünger, 2 älter. hü Hülle, ca Calyptra

wird (Fig. 66). Bei der Reife durchbricht der Kapselstiel beide Hüllen.

Die Gliederung in Achse und Blätter, welche bei Blasia nur angedeutet ist, wird vollends bei Fossombronia und Treubia vollzogen. Bei letzterer sehen wir an der Achse zwei Reihen von normalen Blättern, welche sich mit ihren Rändern decken. An dem vorderen Innenrande jedes Blattes erscheint jedesmal ein Auswuchs, der nach vorn gerichtet ist.

Die Geschlechtsorgane stehen an besonderen kleinen Sprossen. Das zur Weiterentwickelung bestimmte Archegonium wird nach der Befruchtung durch einen Wall umhüllt, der sich ähnlich wie bei Marchantia an der Basis des Archegoniums erhebt und dann erhebliche Dimensionen erreichen kann, so daß auch hier außer der Calyptra noch eine Hülle (Perichaetium) gegeben ist.

Unter den Haplomitroideae erwähnen wir das europäische Haplomitrium und das tropische Calobryum. Das letztgenannte Lebermoos wächst aufrecht und gleicht einem Mnium-Pflänzchen; es ist ausgezeichnet durch 3 Reihen gleichgroßer Blätter. Wurzelhaare fehlen ganz, die Nahrung wird mittels wurzelartiger Stolonen dem Boden entnommen. Die Blätter entstehen aus den Segmenten, welche von der 3seitigen Scheitelzelle abgeschnitten werden. Sie sind quer inseriert, zeigen also die ursprüng-

liche Insertion der Lebermoosblätter; denn auch die dorsiventralen Lebermoose, deren Blätter später schief inseriert erscheinen, haben am Scheitel quer inserierte Blätter.

Archegonien und Antheridien stehen am Ende der Laubsprosse (Fig. 67) zu Ständen

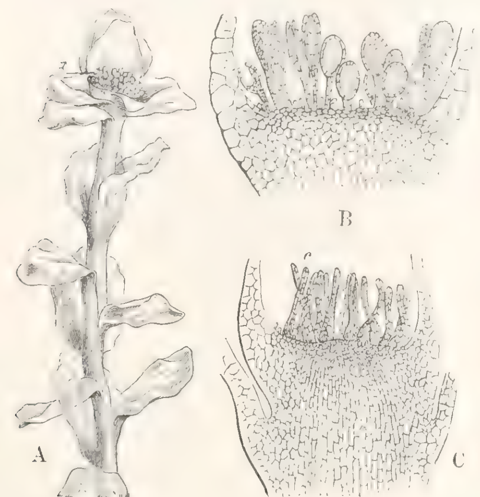


Fig. 67. Calobryum. Nach Engler-Prantl. A männliche (♂) Pflanze. B Antheridienstand. C Archegonienstand.

vereinigt, wie bei einem Laubmoos. Archegonien entstehen sicher noch aus dem zweitjüngsten Segment der Scheitelzelle, und vielleicht wird auch diese noch aufgebraucht. Dann wäre Calobryum zur nächsten Lebermoosgruppe, zu Leitgebs „Jungermanniales acrogynae", zu zählen. Der zweiten Forderung, die Leitgeb an ein acrogynes Lebermoos stellt, genügt Calobryum aber nicht; denn es tritt keine Halbierungswand in der Blattanlage auf, welche diese in einen Ober- und Unterlappen zerlegt. Mit Goebel betrachten wir deshalb Calobryum als eine Metzgeriale; die Pflanze zeigt uns aber, daß auch in dieser Gruppe ein Vorrücken der Geschlechtsorgane nach dem Scheitel hin stattgefunden hat.

Nach der Befruchtung wird keine Hülle um das Archegonium gebildet, dafür wächst die Calyptra um so stärker und tritt an der Basis des gestreckten Kapselstieles auffallend hervor (Fig. 67). Elateren und deren Träger im wesentlichen wie bei Pellia.

4. Jungermanniales. Diese Gruppe, welche vielfach auch den Namen Jungermannioideae acrogyneae führt, ist eben durch die Acrogynie gekennzeichnet, d. h. durch die Tatsache, daß die Archegonien an der Spitze der Sprosse gebildet werden, und daß das Wachstum der letzteren mit der Archegonienbildung stets sistiert wird. Außerdem ist charakteristisch die Entstehung der Blätter aus zwei Segmentabschnitten der Scheitelzelle.

Die Jungermanniales haben dorsiventrale seitlich verzweigte Sproßsysteme. Diese werden gebildet durch annähernd gerundete Achsen, welche auf ihrer Rückseite zwei Blattreihen (Oberblätter) erzeugen (Fig. 68, 69). Zu diesen tritt vielfach noch eine dritte

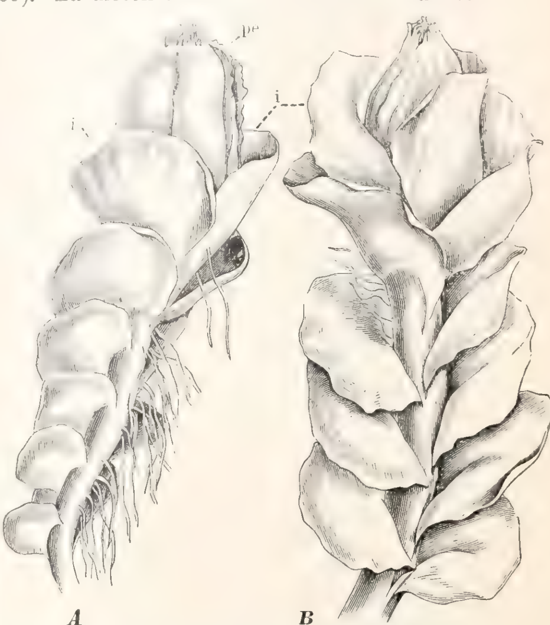


Fig. 68. Nardia. Nach Engler-Prantl. A von der Bauchseite. B vom Rücken. i Involucrum, pe Perichaetium.

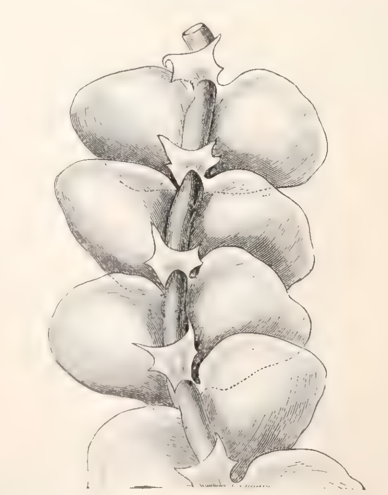


Fig. 69. Leioscyphus, Sproß von der Bauchseite. Nach Engler-Prantl.

Reihe von Blättern auf der Bauchseite, das sind die sogenannten Amphigastrien. Auf der Bauchseite (Fig. 68) brechen auch

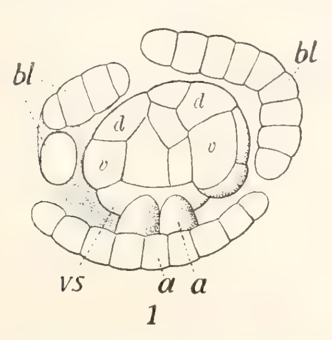
Rhizoiden hervor, welche die ganzen Gebilde am Substrat festhalten, denn viele Lebermoose dieser Gruppe liegen dem Substrat, d. h. lehmigem Boden, Baumstämmen, feuchten Felsen usw., dicht auf. Andere richten ihre Sproßenden vertikal auf, relativ wenige stehen ganz aufrecht.

Die Stämmchen bestehen aus annähernd gleichmäßigen, etwas in die Länge gestreckten Zellen, die gelegentlich, zumal an der Peripherie verdickt sind. Ein Zentralkörper wie bei den Laubmoosen ist nirgends vorhanden. Die Blätter sind fast überall aus einer einzigen Schicht grüner Zellen aufgebaut, vielfach mit regelmäßigen Umrissen, vielfach aber gezähnt, gespalten oder völlig in Einzelfäden aufgelöst.

Die Jungermanniales wachsen mit einer dreiseitigen S c h e i t e l z e l l e und diese ist immer so orientiert, daß eine Fläche der Bauchseite zugekehrt ist, während die beiden anderen schräg gegen den Rücken respektive die Flanken schauen (Fig. 70).

Des weiteren freilich treten außerordentliche Unterschiede auf. Im einfachsten Falle entwickeln sich beide Lappenanlagen völlig gleichmäßig weiter. Die Scheitelzellen dieser stellen langsam ihre Tätigkeit ein, dafür wächst das Blatt an seiner Basis noch lange weiter und so werden die beiden Lappen auf gemeinsamer Basis emporgehoben. So entstehen Blätter wie in Fig. 71, sie sind annähernd quer gestellt und haben kleine und gleiche Lappen. In anderen Fällen sind die beiden Lappen größer, das gemeinsame Basalstück ist kürzer, und im allgemeinen ist der dorsale Blattlappen größer als das bauchwärts gekehrte, doch tritt auch das Umgekehrte ein (Fig. 72). Von hier aus gibt es dann alle Uebergänge bis zu den Fällen, in welchen nur der Oberlappen in die Erscheinung tritt, weil der untere schon gleich nach seiner ersten Anlage auf weiteres Wachstum verzichtet.

Am interessantesten sind die Lebermoose,



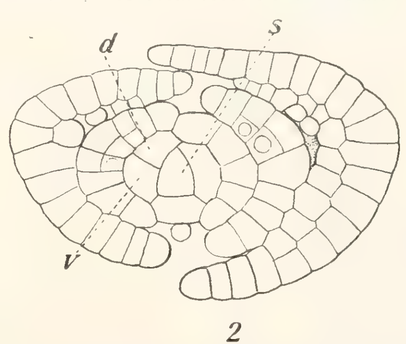


Fig. 70. Scheitelansichten. 1 von Madotheca. 2 von Scapania. Nach Leitgeb. s Scheitelzelle, vs Ventralsegment, a Amphigastrien, bl Blätter, d dorsaler, v ventraler Abschnitt der dorsalen Segmente.

Im allgemeinen entstehen aus den drei sukzessive von einer Scheitelzelle abgegliederten Segmenten auch drei B l ä t t e r (Fig. 70). Natürlich liefern die beiden Rückensegmente die die dorsalen Blattzeilen (Oberblätter), das gegen die Bauchseite gekehrte aber produziert Amphigastrien (Fig. a 70). Wo diese stark entwickelt sind, ist die Scheitelzelle an der betreffenden Stelle breit, wo sie fehlen, pflegt diese Seite sehr verschmälert zu werden (Fig. 70).

Die beiden Segmente, welche zur Bildung der Oberblätter bestimmt sind, zerfallen (Fig. 70) regelmäßig durch eine antikline Wand in eine dorsale (d) und eine ventrale (v) Hälfte. Aus jeder der so gebildeten Zellen schiebt sich eine Papille vor und wird zu einer kleinen Scheitelzelle. Damit sind die Anlagen zweier Blattlappen in jedem Segment gegeben und soweit geht die Entwicklung bei a l l e n Jungermanniales konform.

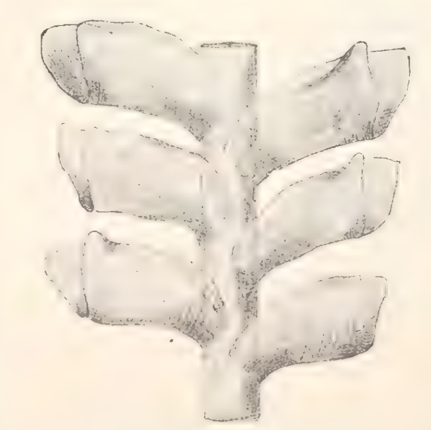


Fig. 71. Sproßstück von Sphenolobus. Nach K. Müller.

bei welchen der untere Blattlappen zu krug- und glockenförmigen Gebilden (Fig. 73) oder

auch zu komplizierten Säcken usw. umgebildet wird. Es handelt sich dann um Epiphyten (siehe den Artikel „Epiphyten“).

Im allgemeinen finden wir bei den Lebermoosen mit aufgerichteten oder aufstrebenden Sprossen quergestellte Blätter wie in Figur 71 und auch oft solche mit annähernd gleichen Blattlappen. Wo aber die Pflänzchen dem Substrat mehr oder weniger fest anliegen, da ordnen sich die Oberblätter mit Vorliebe in zwei sehr regelmäßigen Zeilen. Dann tritt mit besonderer Deutlichkeit die natürlich auch an anderen Formen nachweisbare Blattdeckung in die Erscheinung. Man unterscheidet seit alten Zeiten 2 Fälle: 1. Oberschlächtige Deckung, d. h. der vordere (apicale) Blattrand deckt den Rand des nächstoberen Blattes (Fig. 74, 1). 2. Unterschlächtig nennt man die Blattanordnung dann, wenn der Vorderrand eines

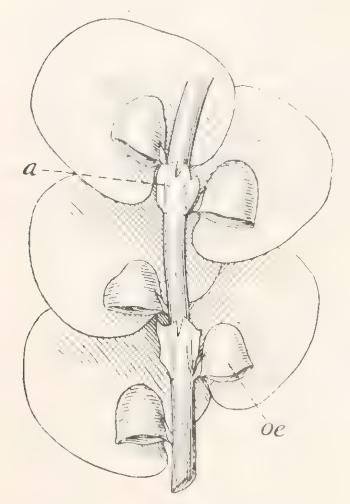


Fig. 73. Frullania. Nach K. Müller. a Amphigastrien, oe Oehrchen.

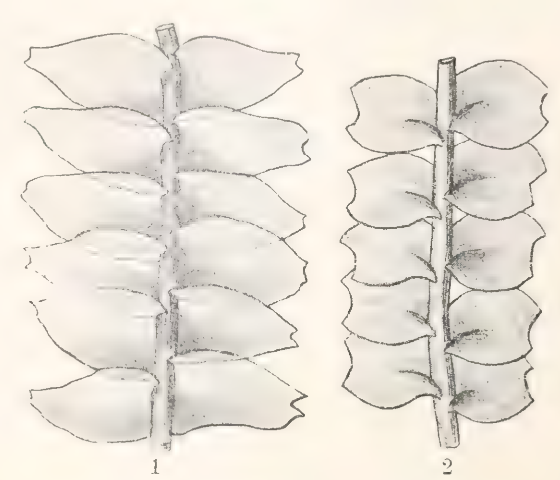


Fig. 74. Nach K. Müller. 1 Calypogeia, Blätter oberschlächtig. 2 Lophozia, Blätter unterschlächtig.



Fig. 72. Gottschea. Nach Lotsy. pe Perianth, ka Kapsel, u unterer, o oberer Blattlappen.

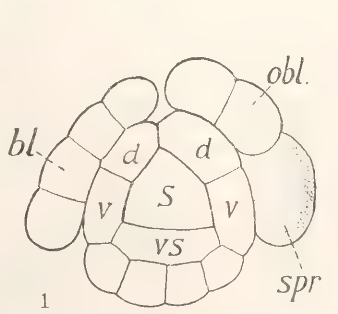


Fig. 75. 1 Scheitel von Lepidozia. Nach Leitgeb. s Scheitelzelle, vs Ventralsegment, d dorsaler, v ventraler Teil der Rückensegmente, spr Seitensproß, obl oberer Blattlappen. bl Blatt. 2 Schema der Verzweigung. Die Zahlen geben das Alter der Segmente an.

Blattes unter den hinteren Rand des nächstoberen Blattes greift (Fig. 74, 2).

Diese Stellungen kommen dadurch zustande, daß die in der Anlage noch annähernd senkrecht zur Längsachse gestellten Blätter Verschiebungen erfahren, derart, daß bald der dorsale, bald der ventrale Rand eines Blattes gegen die Sproßspitze hingedrängt wird.

Die Verzweigung der Stämmchen bei den Jungermanniales geht wie die Bildung der Blätter von der Scheitelzelle aus, und zwar ist der häufigste Fall der, daß ein Seitensproß an Stelle eines bauchwärts gekehrten Blattlappens tritt. Wenn ein Segment in den dorsalen und in den ventralen Teil (siehe oben) geteilt worden ist, treten gerade in dem nach unten gekehrten Segment weitere Teilungen ein, welche zur Bildung einer Scheitelzelle führen, wie das am besten aus Figur 75 ersichtlich ist. Danach ist es verständlich, wenn die Basis eines so entstandenen Zweiges nur von der oberen Blatthälfte flankiert wird.

Wir finden aber auch vollständige Blätter neben den Seitenästen. Hier wölbt sich ein großer Teil des ventralen Segmentes zur unteren Blatthälfte vor und nur ein kleiner (basiskoper) Teil des ersteren liefert die Scheitelzelle des Sprosses. In wieder anderen Fällen können gerade die dorsalen Segmenthälften zur Sproßbildung verwandt werden und endlich gibt es auch Formen, in welchen die ventralen Segmente den Aesten den Ursprung geben.

Gerade bei den letztgenannten Formen wird dann oft in jedem Bauchsegment eine Scheitelzelle angelegt. Viele von diesen ruhen, viele entwickeln sich zu normalen Aesten. Da die Bauchsegmente neben der Zweigscheitelzelle auch noch Amphigastrien liefern, scheinen die Sprosse in der Achsel der ersteren zu stehen.

Auf der Bauchseite werden dann auch Zweige endogen entwickelt. Sie entstehen unter der äußersten Schicht des Stammes und durchbrechen diese, wenn ihre Scheitelzelle in Tätigkeit tritt. So entstehen z. B. die Flagellen von Mastigobryum (Fig. 76). Diese brechen in der Achsel der Amphigastrien hervor, und zwar ganz regelmäßig, acropetal, d. h. die jüngsten Sprosse stehen dem Scheitel zunächst.

Neben solchen halbwegs normal angelegten Zweigen entstehen auf der Bauchseite vielfach Aeste oberflächlich auf adventivem Wege, besser gesagt, aus älteren Segmenten, die schon vielfache Teilungen erlitten haben. Diese Seitenorgane stehen dann ganz regellos.

Die von der Scheitelzelle des Hauptsprosses gebildeten Seitenzweige entwickeln sich in den meisten Fällen ähnlich wie der Hauptsproß, und in der Regel stellen sie Langtriebe dar. Es gibt aber auch Fälle, in welchen neben solchen blatttragende Kurztriebe entwickelt werden (Bryopteris Goebel). Manche Seitenzweiglein entwickeln sich zu Trägern der Sexualorgane. Davon soll alsbald die Rede sein.



Fig. 76. Mastigobryum mit Flagellen-Ast.

Als metamorphe Sprosse können zunächst einmal die sogenannten Flagellen bezeichnet werden. Das sind umgewandelte Zweige, welche bei Lepidozia u. a. dorsal, bei Mastigobryum (Fig. 76) ventral entstehen. Sie sind dünner als die gewöhnlichen Sprosse, haben lange Internodien und ziemlich stark reduzierte fast schuppenförmige Blätter. Sie dringen in den Boden oder zwischen die Moosrasen ein und scheinen zur Aufnahme von Wasser befähigt zu sein. Bei anderen Lebermoosen werden gewisse Aeste völlig zu Rhizomen umgewandelt, um sich in den Boden hinab zu senken (Fig. 77). Und endlich kommt es vor, daß bei xerophytischen Arten (Fig. 78) ventrale Seitensprosse vertikal abwärts wachsen, sich mit zahlreichen Haaren bedecken und so die Wurzeln höherer Pflanzen völlig imitieren.

Auch bei den Jungermanniales findet in ausgiebigem Maße ungeschlechtliche Fortpflanzung statt. Natürlich können zerschnittene Teile der Pflanzen sich regenerieren. Besonders häufig aber erfolgt eine Vermehrung durch sogenannte Gemmen oder Brutkörner. Bei nicht wenigen Vertretern unserer Gruppe sieht man traubenförmige Häufchen lockerer Zellen an den Blättern sitzen, und zwar in der Regel an den obersten d. h. jüngsten Organen dieser Art. Diese Gebilde entstehen dadurch, daß sich die Blattzellen (in erster Linie an den Blattspitzen) unter Abrundung voneinander loslösen oder dadurch, daß sich Sprossungen

ähnlich denjenigen bei Hefezellen aus den Blatträndern oder auch gelegentlich aus den Blattflächen bilden. Auch diese Zellen lösen sich voneinander los. Natürlich können sie allen neuen Pflanzen den Ursprung geben.

Einige Lebermoose (Calypogeia) zeichnen sich durch besondere, aufgerichtete Sprosse aus, welche verkümmerte Blätter zumal an ihrer Spitze tragen. Diese lösen sich dann fast vollständig in Gemmen auf. Vereinzelt (Lophocolea) entstehen sogar junge Pflänzchen direkt an den Blattspitzen.

Geschlechtsorgane. Die Antheridien und Archegonien stehen meistens in Gruppen beisammen, nicht selten untermengt mit Paraphysen. Sie werden wie bei den Laubmoosen von Blättern oder deren Umwandlungsprodukten umgeben und können so eventuell als Infloreszenzen bezeichnet werden. Die Jungermanniales sind bald einhäusig, bald zweihäusig, doch ist damit die Stellung der Geschlechtsorgane nicht ganz erschöpft und man hat demgemäß noch weitere Bezeichnungen eingeführt, die ein Handbuch auch wiederholen muß.

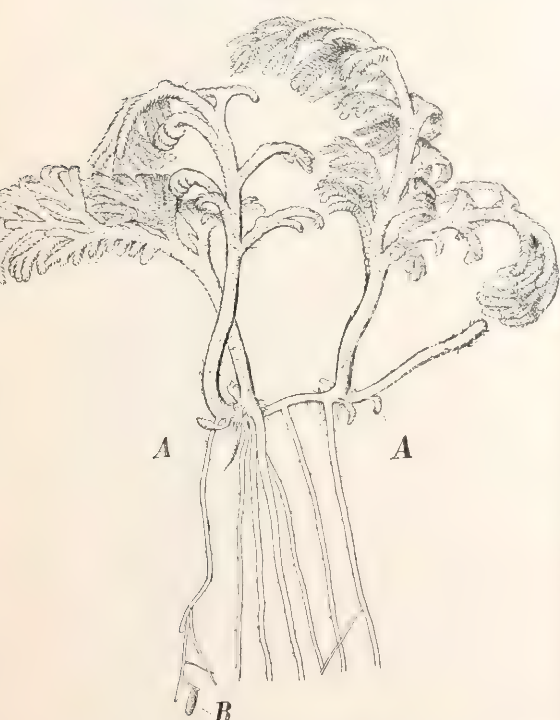


Fig. 77. Lembidium. Nach Goebel. A Ausläufer, B Knolle.

Es kommen folgende Fälle vor:

1. synöcisch. — ♂ und ♀ Geschlechtsorgane stehen gemischt in derselben Blütenhülle;
2. paröcisch. — Der mit einer Zwitter- oder rein ♀ Blüte abschließende Sproß trägt unterhalb derselben Antheridien;
3. autöcisch. — ♂ und ♀ Geschlechtsorgane auf derselben Pflanze, aber in getrennten Ständen (der weitaus verbreitetste Fall);
4. heteröcisch. — Synöcische oder paröcische und autöcische Blüten auf derselben Pflanze;
5. diöcisch. — ♂ und ♀ Blütenstände auf verschiedenen Individuen;
6. polyöcisch. — ♂ und ♀ Blüten stehen entweder auf einem Individuum oder sind auf verschiedene Pflanzen verteilt.

Die Antheridien werden immer aus Rückensegmenten gebildet, und zwar aus dem dorsalen Teil derselben. Die Scheitelzelle wird für ihre Ausbildung niemals in Anspruch genommen, so daß die antheridientragenden Sprosse vielfach auch noch nach der Bildung der männlichen Sexualorgane weiterwachsen können. Die Antheridien entstehen in der Blattachsel zu einer Zeit, in der die Blätter selber schon ziemlich weit entwickelt sind. Und zwar steht das älteste Antheridium immer in der Mediane des Blattes. Sie gehen aus einer einzigen Zelle hervor, haben einen dünnfädigen Stiel und einen fast kugeligen Kopf. Ihre Hüllblätter sind von gewöhnlichen Laubblättern häufig nicht unterschieden. Oft aber wird

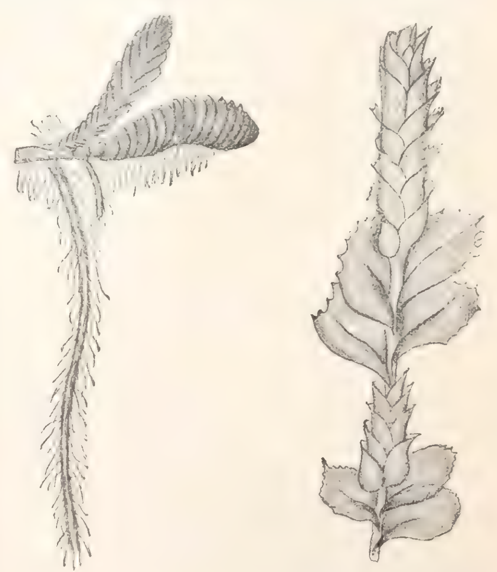


Fig. 78. Notoscyphus. Nach Lotsy. Mit wurzelähnlichem Sproß.

Fig. 79. Männliche Sprosse von Plagiochila. Nach K. Müller.

der Oberlappen zum Schutze des Antheridiums besonders ausgestaltet (Fig. 79).

Im Gegensatz zu den Antheridien bedingt die Entwickelung der Archegonien immer einen Stillstand im Wachstum des sie tragenden Sprosses, denn sie werden aus der Scheitelzelle selber oder aus den unmittelbar benachbarten Segmenten gebildet, und selbst in den Fällen, wo die Scheitelzelle nicht zur Archegonienbildung aufgebraucht wird, stellt dieselbe ihr Wachstum ein. Die Zahl der an einem Sproßende entwickelten und beisammenstehenden Archegonien wechselt in den verschiedenen Gattungen zwischen 1 und 100.

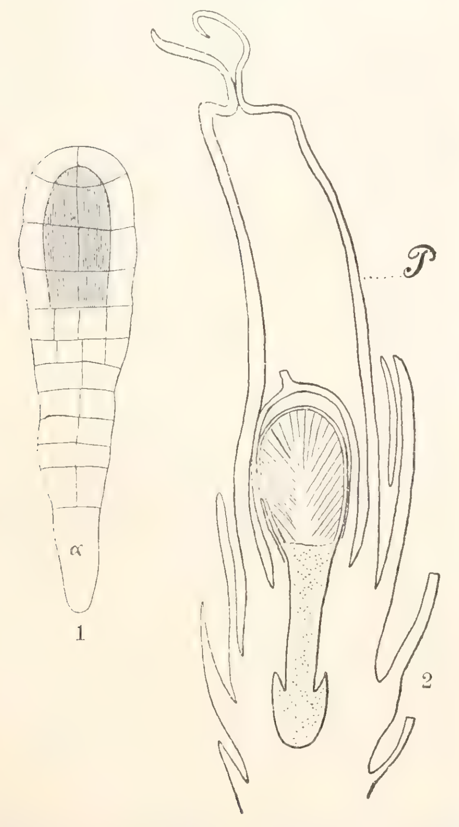


Fig. 80. 1 Embryo von Radula. α sterile Zelle. 2 junges Sporogon von Jungermannia. Nach Goebel, P Perianth.

Die Archegonienstände sind umgeben von besonders entwickelten Hüllblättern, dem Involucrum (Fig. 81). Innerhalb derselben entwickelt sich fast immer noch eine zweite Hülle, das Perianthium (Calyx) (Fig. 81). Dasselbe ist meistens von ziemlich erheblicher Größe und von ganz außerordentlich verschiedener Ausbildung, derart, daß es zur Unterscheidung der Gattungen und Arten verwendet werden kann. Leitgeb wies nach, daß das Perianthium unabhängig von der Befruchtung gebildet wird. Und zwar entsteht es durch Auswachsen derjenigen drei Segmente, welche unmittelbar unterhalb der Archegonienanlagen liegen. Es handelt sich also um nichts anderes als um drei Blätter, welche aber miteinander verwachsen sind.

Nach der Befruchtung des Archegoniums wächst die Zygote in ganz ähnlicher Weise (Fig. 80), wie in den früheren Gruppen zum Sporogonium heran. Auch hier wird die durch die erste Querwand basalwärts abgegliederte Zelle (α Fig. 80, 1) für den Aufbau des Embryo nicht mitbenutzt. Sowohl der Stiel wie die Kapsel gehen aus der oberen Hälfte der Zygote hervor. Das Archespor entsteht wie früher aus einer oder aus mehreren Etagen von inneren Zellen, wie sie in Fig. 80, 1 schraffiert sind.

Der Archegonienbauch wächst vielfach zu einer stark entwickelten Calyptra heran (Fig. 80, 2). Der Stiel schiebt sich mit verbreitertem Fuß in den Scheitel des Stämmchens (Fig. 80, 2). Die Kapselwand besteht später aus wenigen Schichten. Das Archespor zerfällt in Sporen und Elateren, dann streckt sich der Stiel gewaltig und hebt die Kapsel über Involucrum, Perichaetium usw. hinaus (Fig. 81).

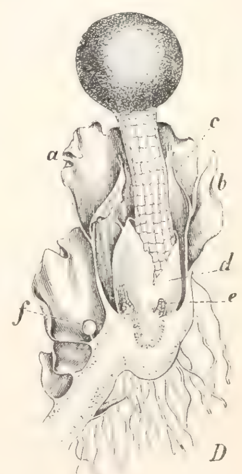


Fig. 81. Nardia haematosticta, fruchtende Pflanze im Längsschnitt. Nach Engler-Prantl. a Involucralblätter, b Involucralamphigastrien, c Perianthium, d Calyptra, e unbefruchtet gebliebene Archegonien, f Antheridium.

Bei dem „Jungermannia-Typus" liegen die Elateren ohne wahrnehmbare Ordnung im Sporenraum. Oeffnet sich nun die Kapselwand mit vier Klappen, so beginnt eine Austrocknung der Elaterenmasse und damit ein Ausschleudern der Sporen, das nach wenigen Minuten beendet ist. Bei einigen Vertretern dieses Typus sind die Elateren (Fig 80, 2) der Sporenwand innen angeheftet und konvergieren nach innen, lassen aber in der Mitte einen Raum frei, der nur Sporen enthält. Beim Oeffnen springen sie von

ihrer Anheftungsstelle los und schleudern die Sporen fort.

Ueber einen zweiten, den Frullania-Typus (Fig. 82), sagt Goebel: „Hier sind die Elateren einander annähernd parallel in der Längsachse des Sporogons angeordnet; ihre verbreiterten Enden sind mit der Innenfläche der Kapsel in Verbindung; bei der Oeffnung des Sporogons reißen sie an ihrer Basis ab und bleiben mit dem oberen Ende an der Sporogonwand sitzen. Die Oeffnung der Kapsel erfolgt bei Frullania sehr rasch — ein Ruck, und die Sporen sind weggeschleudert. Offenbar werden die Elateren beim Zurückbiegen der Klappen gespannt, reißen dann ab, schnellen dadurch los und schleudern die Sporen fort die hygroskopischen Bewegungen, welche die Elateren auch hier ausführen können, haben nur eine nebensächliche Bedeutung."

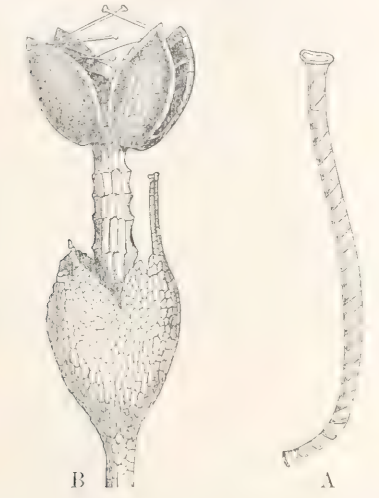


Fig. 82. A Elatere von Frullania. B geöffnete Kapsel von Leptolejeunia. Nach Engler-Prantl.

Es gibt nun eine Anzahl von Jungermannien, welche durch Geocalycie ausgezeichnet sind; sie haben den Namen „marsupifere" Lebermoose erhalten. Es handelt sich um Formen, welche ihre Archegonien und vor allem die Sporogone in ein beutelartiges Organ verlegen; und dieses Gebilde wird dann (Fig. 83) meistens tief in den Boden hinabgeschoben, zumal bei Formen, welche auf trockenem Boden leben. Durchschneiden wir einen solchen Sack, so finden wir denselben oben an der Achse mit einem mäßig dicken Stiel angeheftet, ein mehr oder weniger breiter Kanal führt auf den Grund desselben auf welchem später die Sporogone sichtbar werden. Aus diesen Beutelchen werden die Sporogone später weit herausgeschoben.

Die Entstehung dieser Säcke geschieht in der Weise, wie es das Schema (Fig. 84) angibt. Der seitlich am Hauptsproß sitzende Fruchtast ist in seiner allerersten Jugend noch gerade. Später aber zeigt er an seiner

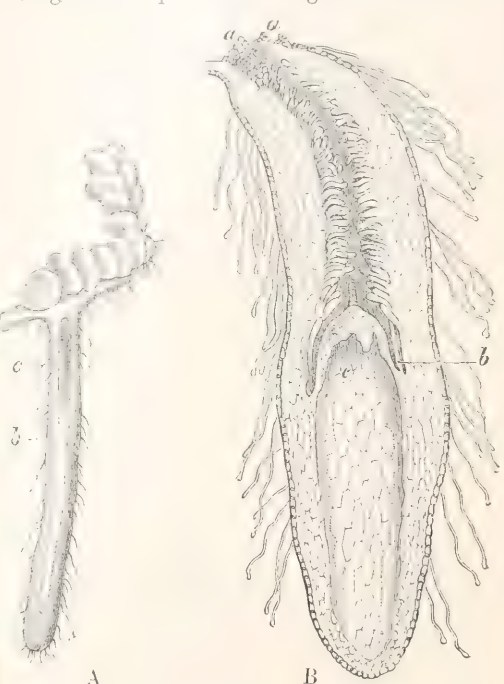


Fig. 83. A Calypogeia ericetorum, Sproß mit Fruchtsack b u. fast reifem Sporogonium c. B Kantia trichomanis, entwickelter Fruchtbeutel im Längsschnitt, a Schuppenblättchen, b unbefruchtetes Archegoium, c Calyptra. Nach Engler-Prantl.

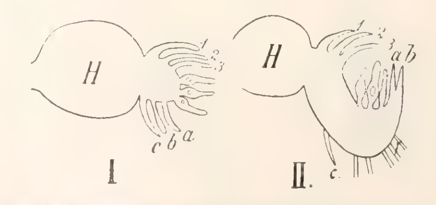


Fig. 84. Schema der Sackbildung bei Calypogeia. Nach Lotsy, aus Goebel. H Hauptsproß, 1—3, a—c Blätter.

ventralen Seite eine ganz außerordentliche Vermehrung der Zellen und durch das energische Wachstum, das sich an seiner Bauchseite vollzieht, werden dann die Archegonien zunächst in eine mäßig tiefe Grube versenkt. Bei solch einfacher Becherbildung kann es sein Bewenden haben. Meistens aber werden die Beutelchen dadurch vertieft und verlängert, daß an ihrer Unterseite an den im Schema punktierten Stellen ein energisches Wachstum einsetzt,

das nun die Archegonien tief in den Boden hinabführt.

Literatur. ***Brotherus***, *Bearbeitung der Bryales in Engler-Prantl, I_3.* — ***D. H. Campbell***, *The structure and development of the Mosses and Ferns. London 1895.* — ***C. Correns***, *Untersuchungen über die Vermehrung der Laubmoose durch Brutorgane. Jena 1899.* — ***K. Goebel***, *Organographie der Pflanzen, insbesondere der Archegoniaten und Samenpflanzen. Jena 1898 bis 1901.* — ***Derselbe***, *Archegoniatenstudien, in Flora, 1893, 1898, 1906, 1908.* — ***G. Haberlandt***, *Beiträge zur Anatomie und Physiologie der Laubmoose. Jahrb. f. wiss. Bot. 17, 1886, S. 359—498.* — ***Leitgeb***, *Untersuchungen über Lebermoose. Graz 1874 bis 1881.* — ***Limpricht***, *Bearbeitung der Laubmoose in „Rabenhorsts Kryptogamenflora usw., IV. Leipzig 1890.* — ***J. P. Lotsy***, *Vorträge und botanische Stammesgeschichte II. Bd. Jena 1909.* — ***K. Müller***, *Bearbeitung der Lebermoose in „Rabenhorsts Kryptogamenflora" VI. Leipzig 1906 bis 1911.* — ***G. Roth***, *Die außereuropäischen Laubmoose. Dresden 1911.* — ***Schiffner***, *Bearbeitung der Hepaticae. In Engler-Prantl $I_{3,1}$.* — ***W. Ph. Schimper***, *Synopsis Muscorum Europaeorum. Stuttgart 1860.* — ***Schimper, Bruch und Gümbel***, *Bryologia europaea. Stuttgart 1836 bis 1851.*

F. Oltmanns.

Moostierchen.

Stockbildende, im Wasser lebende, durch einen moosähnlichen Habitus ausgezeichnete Tiere, die gewöhnlich zusammen mit den Brachiopoden als Molluscoiden bezeichnet und in dem Artikel „Bryozoa" behandelt werden.

Moraenen.

Von Gletschern gebildete Anhäufungen lockeren Gesteinsmaterials (siehe den Artikel „Eis").

Morison

Robert.

Botaniker. Geboren 1620 zu Aberdeen. Er erhielt seine Bildung auf der dortigen Universität, wo er anfänglich Mathematik, später Medizin und Botanik studierte. Später diente er als Soldat in der königlichen Armee gegen Cromwell, wurde in der Schlacht bei Brigg verwundet, und begab sich nach seiner Genesung nach Paris. In Frankreich wurde er 1850 Aufseher des dem Herzog von Orléans gehörigen Gartens in Blois, von wo aus er verschiedene Gegenden Frankreichs bereiste und Pflanzen sammelte. Nach dem Tode des Herzogs, 1660, kehrte er nach England zurück, wo er alsbald Leibarzt König Karls II., sowie Aufseher der Königlichen Gärten wurde. 1669 wurde er Professor der Botanik in Oxford. Dort starb er am 10. Novemb r 1683. Unter seinen Werken seien genannt: Seine zutreffende, aber gehässige Kritik des Bauhinschen Pinax (1669) und aus demselben Jahre die zweite Ausgabe des Hortus Blesensis (London 1669), worin gegenüber der von Brunger herrührenden ersten Ausgabe einige neue Pflanzen enthalten sind. Ferner verteidigt er hierin gegen die Hypothese der generatio aequivoca seine Ueberzeugung, daß alle Pflanzen aus Samen entstanden seien. Besonders bekannt ist seine Plantarum Umbelliferarum distributio nova (Oxford 1672), worin die systematischen Beziehungen innerhalb dieser Familie eingehend behandelt werden. Von seiner nach seinem Tode von Jakob Boward vollendeten, in der systematischen Anordnung nicht sehr glücklichen Historia plantarum universalis Oxoniensis erschienen zu seinen Lebzeiten nur fünf von den 15 Klassen.

Literatur. ***Pulteney***, *Geschichte der Botanik, übersetzt von* ***G. Kühn***, *Leipzig 1798, S. 215.*

W. Ruhland.

Morphologie der Tiere und Pflanzen

(experimentelle Morphologie)

siehe den Artikel „Entwicklungsmechanik und Entwicklungsphysiologie".

Murchison

Roderik Impey.

Er wurde am 19. Februar 1792 zu Tarradale in Schottland geboren; für die militärische Laufbahn bestimmt, genoß er seine Erziehung in Great Marlow, nahm 1807 als Offizier an dem Feldzug in Spanien teil, verließ aber 1816 den Militärdienst, um sich dem Studium der Naturwissenschaften zu widmen, wozu er vor allem durch seine Gemahlin, die hochgebildete Tochter des Generals Hugonin angeregt wurde. Seine literarische Tätigkeit begann mit Abhandlungen über die Geologie von Sussex, Nordschottland und Arran. 1828 bereiste er mit Ch. Lyell Frankreich und Oberitalien, studierte 1829 mit Sedgwick die österreichischen und bayrischen Alpen und begann 1831 seine berühmten Untersuchungen über die paläozoischen Ablagerungen in Wales, die er dann in Devonshire, Deutschland, Belgien und Rußland fortsetzte. Von Bedeutung ist weiterhin seine Expedition im Jahre 1841 nach dem Ural, die nicht nur den Nachweis silurischer und devonischer Ablagerungen in Rußland erbrachte, sondern auch die Aufstellung des „Permischen Systems" zur Folge hatte. Murchison war 1830 Mitgründer der englischen Geographischen Gesellschaft, 1843 bis 1858 ihr Präsident; zweimal präsidierte er der englischen Geologischen Gesellschaft. 1855 wurde er, als Nachfolger von

de la Beche, Generaldirektor der Geological Survey von Großbritannien, erhielt später die Wollaston-Medaille und 1866 den Baronettitel. Auf die Geologie und ihre Entwicklung hat er einen hervorragenden Einfluß ausgeübt; auch nahm er in der Londoner Gesellschaft eine führende Stellung ein. Er starb am 22. Oktober 1871.

Seine bedeutendsten Werke sind: The Silurian System founded on geological researches in the counties of Salop, Hereford, Radnor, Montgomery, Caermarton, Brecon, Pembroke, Monmouth, Gloucester, Worcester and Stafford. Part I and II, London 1839; On the Glacial Theory (Anniv. Adress. Geol. Soc. Ibid. 1842 XXXIII. S. 124); in Gemeinschaft mit Sedgwick: On the distribution and classification of the Older or Palaeozoic Deposits of the North of Germany and Belgium. Transactions Geol. Soc. 1842, Bd. 6; followed by a description of the fossils by d'Archiac and Verneuil (deutsch von G. Leonhard, Stuttgart 1844) und A sketch of the structure of the Eastern Alps with sections plates and map. Trans. London geol. Soc. 1831; in Gemeinschaft mit de Verneuil und von Kayserling On the geological structure of the northern and central regions of Russia in Europa. London 1842 und The Geology of Russia in Europe and the Ural mountains Bd. 1 Geology London (ins Deutsche übersetzt von G. Leonhard, Stuttgart 1848), Bd. 2, Paléontologie 1845 (in französischer Sprache); Siluria The History of the oldest fossiliferous Rocks and their foundations London 1854 (3. und letzte Auflage 1859); Geological Atlas of Europe. Edinburg 1856.

Literatur. ***Geikie,*** *Life of Sir R. Murchison, Journals and letters, London, 1875.*

O. Marschall.

Mure.

Schuttkegel der Wildbäche im Gebirge, dort, wo steile Seitentäler in das Haupttal einmünden. Sie sind häufig mit Wasser durchtränkt und geraten nicht selten in Bewegung — Murbrüche (siehe den Artikel Flüsse").

Müller
Fritz.

Biologe. Geboren am 31. März 1822 zu Windischholzhausen bei Erfurt, studierte von 1841 bis 1844 in Berlin und Greifswald Naturwissenschaften und Mathematik und von 1845 ab Medizin. Er wanderte 1848 in die deutsche Kolonie Blumenau des südbrasilischen Staates Santa Catharina aus, wo er zunächst als Farmer lebte. 1856 wurde er Lehrer am Lyceum zu Desterro auf der Insel Santa Catharina, kehrte aber 1867, zur Aufgabe seines Lehramtes durch Umtriebe von Jesuiten gezwungen, nach Blumenau zurück, wo er am 21. Mai 1897 starb. Müller war vor allem ein vorzüglicher Beobachter, wie seine zahlreichen Entdeckungen auf botanischem und zoologischem Gebiete beweisen. Hier seien nur genannt seine Studien über Biologie und Stammanatomie der Kletterpflanzen, vor allem aber über Biologie der Blüten und deren Anpassung an Tierbesuch, dann seine entomologischen Studien, die ebenfalls zahlreiche neue Entdeckungen ergaben, so über die Dufteinrichtungen männlicher Schmetterlinge, Fälle von Mimicry, die Biologie der Bienen, Dipteren, Termiten, Ameisen usw. Berühmt wurde u. a. seine Beobachtung über Cecropia adenopus als „Ameisenpflanze". Ferner sind seine zahlreichen Beobachtungen über Verbreitungseinrichtungen von Pflanzen nicht zu vergessen. Von großem Einfluß auf seine Arbeiten war sein Briefwechsel mit Ch. Darwin. Seine Schriften sind in zahlreichen Zeitschriften verstreut, Beobachtungen von ihm auch in Arbeiten von Hildebrand, seines Bruders Hermann Müller, Ludwig, A. Möller usw. veröffentlicht.

Literatur. ***E. Loew*** *in Ber. d. Deutsch. Botan. Gesellschaft XV, 1897, S. (12).*

W. Ruhland.

Müller
Hermann.

Botaniker. Geboren am 23. September 1829 zu Mühlberg in Thüringen als Sohn eines Pfarrers und Bruder des vorigen, studierte 1847 bis 1849 in Halle und von da ab bis 1852 in Berlin Naturwissenschaften, besonders Geologie und Botanik. 1852 bestand er das Oberlehrerexamen, 1855 wurde er als Lehrer an die Realschule in Lippstadt berufen, wo er bis zu seinem Tode, seit 1883 als Professor, wirkte. Er starb in Prad bei Meran am 25. August 1884. Abgesehen von einigen geognostischen, bryologischen und floristischen Veröffentlichungen behandeln die Arbeiten Müllers vor allem die gegenseitigen Anpassungsverhältnisse von Blumen und Insekten, ein Gebiet, auf dem er eine außerordentliche Fülle neuer Tatsachen entdeckt hat. Diese sammelte er meist auf Reisen in verschiedene Gegenden Deutschlands, besonders aber bei wiederholten Besuchen der Alpen. In seiner Deutung der Tatsachen stand er ganz auf dem Boden der Darwinschen Lehre von der Artentstehung durch natürliche Zuchtwahl. Seine Beobachtungen sind in einer großen Zahl kleinerer in verschiedenen Zeitschriften zerstreuter Aufsätze niedergelegt, die vielfach in fremde Sprachen (Italienisch, Englisch) übersetzt wurden. Unter den größeren Arbeiten seien genannt: Die Befruchtung der Blumen durch Insekten (Leipzig 1873). Die Wechselbeziehungen zwischen den Blumen und den ihre Kreuzung vermittelnden Insekten (Breslau 1879, Schenks Handb. d. Botan.). Die Alpenblumen, ihre Befruchtung durch Insekten und ihre Anpassungen an dieselben (Leipzig 1881).

Literatur. ***Ludwig*** *in Botan. Centralbl. 1884, Bd. XVII, S. 393; hier auch ein Schriftenverzeichnis.*

W. Ruhland.

Müller

Johannes.

1801 bis 1858, der Begründer der modernen biologischen Schule in Deutschland. Er war der Sohn eines Schuhmachers in Coblenz, zeigte schon als Knabe ungewöhnliche Begabung, fand deswegen die Protektion des nachmaligen bekannten vortragenden Rats im preußischen Unterrichtsministeriums Johannes Schultze, studierte seit 1819 in Bonn, gewann bereits als Student einen Fakultätspreis mit der Arbeit über die Respiration des Fötus, promovierte 1822, hielt sich 1½ Jahr in Berlin zur Absolvierung seiner Staatsprüfung als Assistent von Rudolphi auf, habilitierte sich 1825 in Bonn, wurde dort 1826 außerordentlicher, 1830 ordentlicher Professor und folgte 1833 einem Ruf als Nachfolger Rudolphis nach Berlin, wo er seine berühmte Tätigkeit als Lehrer und Forscher entfaltete, die so umfassend sich gestaltete, daß im Rahmen und Plan dieses Handbuches eine einigermaßen entsprechende Würdigung unmöglich ist. Müller vertrat allein als Lehrer menschliche vergleichende Anatomie, Physiologie, Entwickelungsgeschichte und pathologische Anatomie, und in allen diesen Gebieten bewegten sich auch seine bahnbrechenden Leistungen. Dabei hatte er noch die Verwaltung eines Museums zu leisten, das er von 7000 übernommenen Nummern auf 12 380 Stücke während der 25 Jahre seiner amtlichen Tätigkeit förderte. An dieser Stelle seien nach Waldeyers Darstellung im Biographischen Lexikon hervorragender Aerzte (IV 303) nur folgende Arbeiten Müllers in der Physiologie und physiologischen Chemie zusammengestellt: Untersuchungen über phantastische Gesichtserscheinungen, der erste exakte Beweis des Bellschen Lehrsatzes durch das Experiment am Frosche, die erste genaue Darstellung der Lehre von den Reflexbewegungen, den Mitempfindungen und vom Gesetz der exzentrischen Empfindung, Nachweis der Tonbildungsgesetze im Kehlkopf als entsprechend denen häutiger Zungenpfeifen, verschiedene Arbeiten über die Schalleitung in der Paukenhöhle, über die Physiologie des Blutes usw. Auch die mikroskopisch anatomischen Untersuchungen wurden bereits von Müller erheblich gefördert. Die Zahl seiner wissenschaftlichen Abhandlungen beträgt weit über 200, darunter befindet sich eine große Zahl stattlicher und umfangreicher Monographien. Sein großes Handbuch der Physiologie des Menschen für Vorlesungen erschien zuerst in Coblenz 1833/34; es erlebte mehrere Auflagen und gehört zu den besten seiner Art. Es ist ein klassisches Werk und kann noch heute mit Genuß gelesen werden. Seine gewaltige und begeisternde Persönlichkeit als Lehrer wird übereinstimmend von der großen Schar derer gerühmt, die zu seinen Füßen gesessen haben.

Literatur. *Biogr. Lex. ed. Pagel.*

J. Pagel.

Muskeln.

Anatomie der Muskeln. Muskelsystem.

1. Begriff. Als Muskulatur bezeichnet man die aktiven Bewegungsorgane der tierischen Organismen. Schon bei einzelligen Organismen (Infusorien unter den Protozoen) findet man in der Rinde des Zellkörpers feine **Fibrillen**, vorwiegend längsverlaufend, welche kontraktile Eigenschaft besitzen. Bei festsitzenden Formen treten auch im Stiel spiralig verlaufende Fibrillen auf. Diese Fibrillen sind die einfachsten kontraktilen Elemente. Bei allen vielzelligen Organismen (Metazoen) bestehen Zellen, welche solche Fibrillen, die teils gleichmäßig glatt sind, teils eine komplizierte Querstreifung zeigen, besitzen. Bei Cölenteraten (Schwämmen, Medusen, Korallen usw.) haben derartige Zellen außer der Fähigkeit, sich durch die in ihnen ausgebildeten Fibrillen zu kontrahieren, noch andere wichtige Leistungen zu versehen, die Arbeitsteilung ist noch nicht ganz durchgeführt. Bei allen höheren Metazoen aber ist die anatomische Differenzierung infolge der vollzogenen Arbeitsteilung weiter geführt, so daß gewisse Elemente des Körpers nur die Fähigkeit sich zu kontrahieren behalten.



Fig. 1. a glatte, b quergestreifte Muskelfibrille. a von einem Wurm, b von einem Wirbeltier.

Diese ist geknüpft an die in ihrem Plasmaleibe ausgebildeten kontraktilen Fibrillen. Solche Elemente sind die Bausteine der Muskulatur und in ihrer Gesamtheit im Körper bilden sie das Muskelsystem. Sämtliche Muskelelemente mit Ausnahme derjenigen der Schwämme, wo dies noch nicht nachgewiesen ist, stehen in Verbindung mit Nervenfasern. Durch diese werden ihnen Reize zugeführt, die ihre Kontraktionen anregen und regulieren.

2. Elemente. Die Formelemente unterscheidet man als 1. Muskelzellen, a) glatte, b) quergestreifte; 2. Epitheliale Muskellamellen; 3. Muskelbänder oder -kästchen, a) glatte, b) quergestreifte; 4. Muskelfasern, a) glatte, b) quergestreifte.

Ihrer Entwickelung nach unterscheidet man 1. mesenchymatöse Muskelelemente, meist Muskelzellen, die im Bindegewebe des Körpers (Mesenchym) auftreten. 2. epitheliale und 3. epithelogene Muskelelemente, deren Ausbildung von Zellflächen (Epithelien) ausgeht. Je nachdem diese Muskelelemente mit ihrem Mutterboden, dem Epithel in Zusammenhang bleiben, oder sich von ihm ablösen und selbständig werden, hat man sie als epitheliale und epithelogene Muskelelemente unterschieden.

Während die mesenchymatösen Muskelelemente meist einzelne Zellen sind, stellen die epithelialen und epithelogenen Muskelelemente anatomisch höher gebaute Gebilde dar, insofern an ihrem Aufbau eine Mehrzahl von Zellen beteiligt ist. Die Zellkörper dieser Zellen sind bei vielen Wirbellosen durch Maceration isolierbar, bei anderen Wirbellosen und Wirbeltieren sind sie zu einer einheitlichen Masse verschmolzen. Die Zahl der darin enthaltenen Kerne ergibt die Zahl der am Aufbau eines solchen Gebildes beteiligten Zellen. Solche Gebilde sind kleine Epithelbezirke, man hat sie auch als Riesenzellen (Syncytien) aufgefaßt (Literatur 2, 3, 4, 5, 17).

3. Muskulatur der Wirbellosen. 3a) Schwämme. Bei den Schwämmen (Spongien) hat man glatte Muskelzellen geschildert. Bei der noch sehr geringen Arbeitsteilung und deshalb noch wenig durchgeführten anatomischen Sonderung der Zellen und Gewebe (Nervengewebe fehlt noch ganz) sind sie nicht mit den Muskelzellen höherer Metazoen vergleichbar. In der Umgebung der Poren der Schwämme hat man spindelförmige Elemente erkannt, welche neben anderen Funktionen auch die Fähigkeit besitzen durch ihre Kontraktionen die Poren zu schließen. In der Peripherie des Muskelzellkörpers sind feine Fibrillen ausgebildet (Literatur 4 S. 269).

3b) Cölenteraten. Bei Cölenteraten finden sich epitheliale und epithelogene Muskelelemente. Mesenchymmuskeln fehlen den Cnidariern, nur bei Ctenophoren sind sie vorhanden.

Bei Hydroidpolypen bestehen selbstständige Muskelzellen noch nicht. Die Zellen des äußeren wie des inneren Keimblattes zeigen an ihrer Basis Plasmafort-



Fig. 2. Ectodermale Epithelmuskelzelle von Hydra. Nach K. C. Schneider. Literatur 4, S. 20, Fig. 19.

sätze, welche kontraktile Fibrillen enthalten (Epithelmuskelzellen). Die Fibrillen in den Zellen des äußeren Keimblattes sind längsverlaufend, während die des inneren



Fig. 3. Epitheliale Muskellamellen einer Meduse. Nach Hertwig. Senkrechter Schnitt.

Blattes ringförmig angeordnet sind (Literatur 4, S. 574 und 579).

Bei Medusen findet man quergestreifte Muskelzellen unter dem Ectoderm an der Subumbrella. Jede Zelle enthält eine Lage quergestreifter Fibrillen im peripheren Teil ihres Zellkörpers. Die Zellen sind zirkulär angeordnet. Durch Auswachsen der basalen Epithelfläche entstehen epitheliale Muskellamellen Fig. 3 (Literatur 7).

Bei Siphonophoren findet man ebenso wie bei andern Hydrozoen epitheliale Muskulatur sowohl im Ectoderm (äußeren Keimblatt) als auch im inneren Blatt (Entoderm). Die Basalfläche des Epithels ist in Form größerer oder kleinerer Falten in die unterliegende Stützsubstanz eingewachsen und bildet Muskellamellen, welche im Innern Plasma mit Kernen, an der Peripherie eine Lage kontraktiler Fibrillen in einfacher Lage enthält. So entstehen epitheliale Muskellamellen, durch Stützsubstanz voneinander getrennt, am Ectoderm stärker ausgebildet und längsverlaufend, am Entoderm viel zarter ausgebildet und zirkulär verlaufend. Durch Delamination kann sich der tiefe Teil des Muskelepithels auch vom Deckepithel ablösen. Auch in der Stützsubstanz angeordnete, abgelöste Muskelelemente kommen vor.

Bei Ctenophoren findet man vielkernige verästelte Muskelelemente im Mesenchym des Körpers und der Tentakel Fig. 4 (Literatur 4, S. 288).



Fig. 4. Teil einer glatten Muskelfaser einer Ctenophore, verästelt mit zahlreichen Zellkernen. Nach Hertwig.

Die Actinien (Korallen) haben epitheliale und epithelogene Muskelelemente. Auch hier treten kontraktile Fibrillen immer im basalen Teil des Epithels in einfacher Lage auf. Eine Vermehrung der Fibrillen findet nicht durch Schichtung der Fibrillen statt,

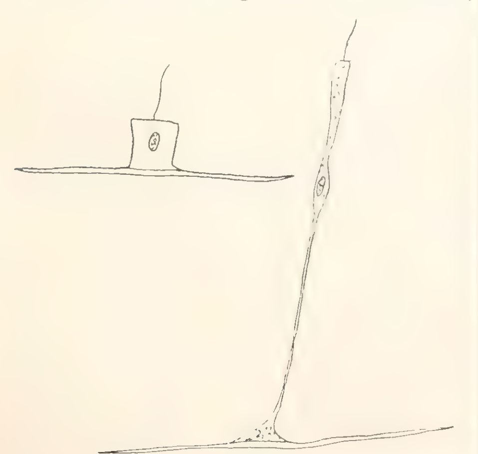


Fig. 5. Entodermale Epithelmuskelzellen einer Actinie. Nach Hertwig.

sondern durch Faltenbildung der einfachen Fibrillenlage unter lamellösem Auswachsen der basalen Fläche des Epithels. In der Regel gehört zu jeder Zelle eine Muskelfaser, die ihrerseits aus feinsten Fibrillen besteht. Der epitheliale Muskel wird zum epithelogenen, indem sich die Lamellen vom Epithel abschnüren. Dann entstehen Muskelröhren, rundlich oder langoval im Querschnitt. Sie haben zentral angeordnete Kerne im Sarkoplasma und einen einfachen geschlossenen Fibrillenmantel an der Peripherie. Während im Ectoderm einfache Längsmuskelzüge

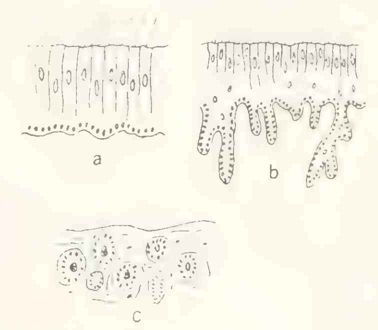


Fig. 6. Epitheliale (a u. b) und epithelogene (c) Muskulatur einer Actinie in senkrechtem Schnitt. Nach Hertwig.

bestehen, auch in den Tentakeln, sind in den Septen der Korallen entodermale Muskeln als epitheliale Muskeln in komplizierter Anordnung vorhanden. Man unterscheidet an den Septen einseitig ausgebildete Längsmuskeln (Muskelfahnen), außerdem Transversal-, Ring- und Parietalmuskelzüge (Literatur 4 S. 630).

3c) Würmer. Die Muskulatur bildet sich vorwiegend vom Mesoderm aus und zwar sowohl epithelogene wie mesenchymatöse Muskulatur. Allgemein besteht ein Hautmuskelschlauch. Die Nematoden haben einen Hautmuskelschlauch mit Ring- und Längsfaserschicht (mesenchymatös).

Die Längsmuskelschicht hat Aehnlichkeit mit epithelogenen Muskeln, ist aber durch das Verhalten der Nerven scharf davon zu unterscheiden: Bei allen epithelogenen Muskeln tritt der Nerv von der Basis her zum Muskelepithel. Bei jenen Längsmuskeln der Nematoden tritt der Nerv aber von der freien Fläche zu den Muskelelementen.

Bei den Scoleciden, das heißt bei Plathelminten, Nemathelminten und Nemertinen lassen sich 3 Teile des Muskelsystems unterscheiden: 1. der Hautmuskelschlauch, durch eine zarte äußere Ringfaserschicht, eine mittlere Diagonalfaserschicht (fehlt bei manchen Formen) und eine sehr kräftige innere Schicht von Längsfasern dargestellt; 2. eine dem Darm angefügte zarte Ringmuskulatur (bei Dendrocoelum: Längsmuskulatur) und 3. dorsoventral und transversal verlaufende Muskelzüge, deren verästelte Endverzweigungen sich bis gegen die Basis der Oberhaut erstrecken. Man hat diese sämtlichen Elemente den mesenchymatösen Muskeln zugerechnet, doch werden von einigen Autoren die Längsmuskeln des Hautmuskelschlauchs als epithelogene Muskeln angesprochen.

An den Blutgefäßen sind ebenfalls so-

wohl ringförmig- wie längsverlaufende Muskelzellen erkannt worden. Auch in der Wandung der Nierenkapillaren finden sich zarte zirkuläre Muskelzellen (Cestoden). Die Muskelelemente sind zweierlei Art: entweder liegt der Kern zentral im Sarkoplasma und die Fibrillen, die niemals Querstreifung zeigen, bilden einen einfachen geschlossenen peripheren Mantel, oder, was viel häufiger vorkommt, besonders im Hautmuskelschlauch, die Fibrillen sind nur einseitig ausgebildet, der Fibrillenmantel ist an einer Seite offen, und hier findet sich reichlicheres Sarkoplasma und der oder die Kerne. Dabei kann aber der Fibrillen enthaltende Teil der Faser lamellös gestaltet sein. Der sarkoplasmatische Teil kann zu einer großen blasenförmigen Ampulle ausgedehnt sein. Diesem Nematodentypus der einseitig offenen Muskelelemente steht der später zu besprechende Hirudineentypus gegenüber, bei welchem die Muskelelemente geschlossene Röhren mit zentral angeordnetem Plasma mit Kernen darstellen. Besonders hervorgehoben seien die quergestreiften Muskelfibrillen in der Wand des Oesophagus bei Ascaris megalocephala. Sie durchsetzen die Wand der Speiseröhre radiär. Schneider leitet sie vom Epithel der Speiseröhre ab und vergleicht sie den Epithelmuskeln der Cnidarier.

Die Anneliden zeigen unter allen Würmern die am höchsten ausgebildete Muskulatur.

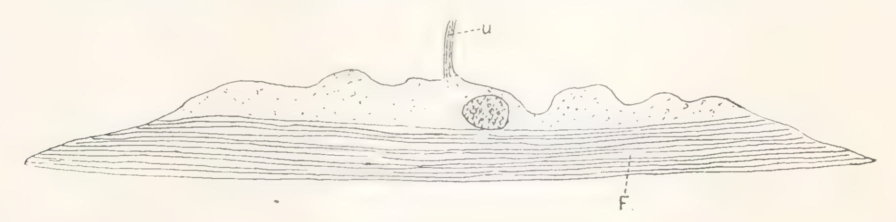


Fig. 7. Isolierte Muskelzelle eines Spulwurms. Nach Hertwig. n Nerv, F Fibrillen.

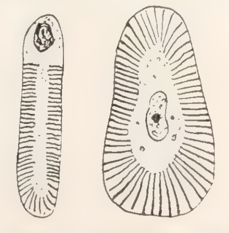


Fig. 8. Muskelfasern eines Anneliden (Branchiobdella) im Querschnitt. Aus Hatschek Literatur 10, S. 123 Fig. 186.

Man unterscheidet Muskelzellen, Muskelkästchen oder -bänder und Muskelröhren. Die Muskelzellen sind langgestreckte Spindeln. Die kontraktilen Fibrillen bilden eine Mantelschicht, zentral ist Sarkoplasma. Der Kern liegt meist seitlich in der Mitte der Länge der Zelle und ist gestreckt stäbchenförmig. Die Muskelkästchen oder Bänder sind größere lamellöse Gebilde, an deren Aufbau eine große Zahl von Zellen teilnehmen. Jedes Band ist durch eine zarte Bindegewebshülle abgegrenzt. Im Inneren findet sich eine große Anzahl kontraktiler feiner bandförmiger Fibrillen in reichlichem Sarkoplasma, das die zahlreichen Kerne enthält. Man hat berechnet, daß etwa zu jeder Fibrille ein Kern gehört. Während bei manchen Formen, z. B. Lumbricus, diese sehr breiten Bänder oder Kästchen ausgebildet sind (Fig. 9), findet man bei anderen, z. B. Eisenia (Fig. 10) die Kästchen durch eingedrungenes Bindegewebe in kleinere Einheiten zerteilt, die einen runden Querschnitt haben; ein jedes Band besteht aus einer größeren Zahl rundlicher Fasern, deren Gruppierung zu Kästchen aber noch deutlich nachweisbar

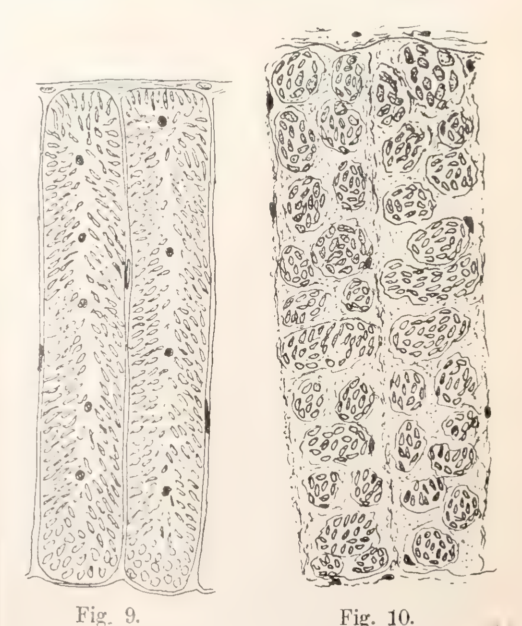


Fig. 9. Fig. 10.

Fig. 9. Muskelkästchen vom Regenwurm im Querschnitt. Nach Hatschek 10, S. 123 Fig. 121.
Fig. 10. 2 Muskelkästchen eines Anneliden (Eisenia veneta) im Querschnitt (Zerklüftung). Nach Schneider 4, S. 410, Fig. 383.

ist (Literatur 4 S. 408—410). Bei Hirudineen ist aber die Kästchenstruktur ganz geschwunden und man findet an Stelle der Kästchen drehrunde Fasern, mit zentralem Plasma und Kernen und peripherem geschlossenem Fibrillenmantel.. Diese Verhältnisse bilden eine interessante Parallele zu gewissen kontraktilen Elementen der Wirbeltiere: Bei Neunaugen bestehen Muskelbänder. Diese werden bei Myxinoiden zu Muskelfasern durch eindringendes Bindegewebe zerteilt, dabei ist aber die Bänderanordnung noch erkennbar. Bei allen höheren Wirbeltieren ist die Bänderanordnung, die zuweilen embryonal noch nachweisbar ist, später ganz verwischt durch die gleichmäßige Verteilung des Bindegewebes zwischen den Muskelfasern. Bei Besprechung der Verhältnisse der Wirbeltiere komme ich darauf zurück.

den Längsmuskel noch eine äußere Lage zirkulärer mesenchymatöser Muskelzellen hinzu (Polychäten und Oligochäten). Dabei ist der Längsmuskel in verschiedener Weise in mehrere (4, 5 oder mehr) getrennte Züge gesondert. Bei Hirudineen endlich sind am Hautmuskelschlauch drei Schichten zu unterscheiden, insofern zwischen der äußeren Ring- und der inneren Längsmuskelschicht eine mittlere Schicht aus sich kreuzenden Diagonalfasern, ebenfalls mesenchymatöser Art nachweisbar ist. Nur der Längsmuskel besteht aus Muskelbändern oder -kästchen epithelogener Art, bei Polygordius und Polychäten einfacher gebaut, als bei Oligochäten. Bei letzteren bestehen insofern Unterschiede, als bei einigen, z. B. Eisenia rosea, die Kästchen geschlossen bestehen, während sie bei anderen (Eisenia veneta) zu kleineren, rundlichen Faserbezirken zerteilt sind Fig. 9

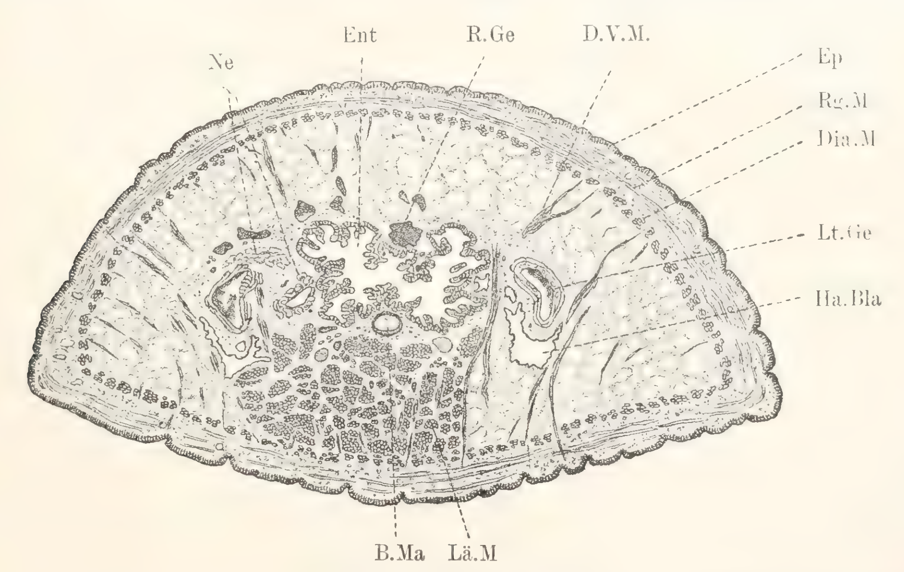


Fig. 11. Hirudo medicinalis, Querschnitt. Ep Epiderm, Ent Enteron, B.Ma Bauchmark, Lä., Rg., Dia. und D.V.M. Längs-, Ring-, Diagonal- und Dorsoventralmuskulatur, R. und Lt.Ge Rücken- und Lateralgefäß, Ne Nephridium, Ha.Bla Harnblase.

Hinsichtlich ihrer Entwickelung pflegt man die Muskelkästchen der Anneliden und ihre Derivate, die Muskelröhren als epithelogene Elemente aufzufassen, da sie von dem Epithel des Mesoderms abstammen. Die übrigen Muskelzellen sind zu kontraktilen Zellen umgewandelte Bindegewebselemente und demnach Mesenchymmuskulatur.

Die Muskelelemente sind bei Anneliden in folgender Weise im Körper angeordnet: Es besteht ein Hautmuskelschlauch unmittelbar unter der Oberhaut. Er besteht entweder nur aus einer einheitlichen Lage längsverlaufender Muskelkästchen (Polygordius), oder es kommt zu diesem immer bestehenden

und 10. Bei Hirudineen sind die Kästchen durch drehrunde Fasern ersetzt, von Kästchenstruktur ist nichts mehr nachweisbar. Die Ringmuskulatur der Haut steht auch mit etwa vorhandenen Borsten in Beziehung, für welche sie Protraktoren und Rotatoren sind. Außer dem Hautmuskelschlauch ist die Muskulatur des Darms, der Mesenterien und Transversalsepten zu unterscheiden.

Die Darmmuskulatur besteht bei Polygordius, dem Uranneliden, nur aus sehr zarten Längsfasern, besonders in der ventralen Darmwand. Bei Polychäten besteht am Darm eine äußere Längs- und innere Ringmuskelschicht. Bei Oligochäten und Hiru-

dineen eine äußere Ring- und innere Längsmuskelschicht.

In dem dorsalen und ventralen Mesenterium und ebenso in den Transversalsepten sind Muskelzellen in Bündeln angeordnet. Endlich finden sich in den Wandungen der Blutgefäße Muskelfibrillen, die zirkulär angeordnet, stets in unmittelbarer Beziehung zu dem das Gefäßlumen auskleidenden Epithel (Endothel) stehen.

Den Anneliden anzuschließen sind Peripatus, Balanoglossus und Sagitta. Bei allen besteht ein Hautmuskelschlauch (Literatur 4 S. 453, 683, 693): bei Peripatus läßt er eine äußere Ring-, eine mittlere gekreuzte, also doppelte Diagonalfaserschicht und eine innerste, zugleich die mächtigste, Längsfaserschicht unterscheiden. Bei Balanoglossus findet man nur eine zarte äußere Ring- und eine mächtigere innere Längsmuskelschicht und bei Sagitta ist nur ein Längsmuskel vorhanden. Sagitta hat quergestreifte Muskelfasern, während Balanoglossus und Peripatus glatte Elemente besitzen.

Bei Peripatus finden sich mehrkernige Fasern mit Sarkolemm, ähnlich den Muskelfasern der Insekten, aber die Fibrillen zeigen keine Querstreifung.

Bei Peripatus bildet die äußere Ringmuskulatur auch das Material für die Protraktoren der Krallen, und es findet sich außerdem nur an den Körperseiten ausgebildet eine innerste Ringmuskellage, welche die wesentlichen Extremitätenmuskeln liefert (Sagittalmuskeln).

Die Muskulatur des Darms ist durch mesenchymatöse Muskelelemente dargestellt. Bei Peripatus läßt sich eine äußere Ring- und innere Längszellenschicht unterscheiden, bei Balanoglossus besteht nur eine Ringmuskelschicht und auch bei Sagitta ist nur eine einzige sehr zarte Faserlage in Zusammenhang mit dem Cölomepithel erkennbar.

Endlich zeigen auch diese drei Formen in den Mesenterien und in den Transversalsepten mesenchymatöse Muskelzellen in radiärer Anordnung.

3d) Arthropoden. Sie sind ausgezeichnet durch den Besitz quergestreifter Muskelfasern von ähnlich kompliziertem Bau wie ihn diese Elemente bei Wirbeltieren besitzen. Die Querstreifung beschränkt sich aber nicht auf die Rumpfmuskulatur wie bei Wirbeltieren, sondern sie besteht auch an den Fibrillen der Darm- und Gefäßmuskelelemente. Die Elemente der Rumpfmuskulatur sind drehrunde Fasern, durch ein Sarkolemm abgeschlossen, das eine zarte Membran von längsstreifiger Struktur darstellt. Im Innern finden sich kontraktile Fibrillen mit sehr kompliziert quergestreifter Struktur. Jede Fibrille setzt sich zusammen aus regelmäßig sich folgenden Schichten einer einfach und einer doppelt lichtbrechenden Substanz (isotroper und anisotroper Substanz). In diesen Schichten werden wieder besondere Abschnitte unterschieden, von welchen einer als Zwischenscheibe in der Mitte der isotropen Substanz eine besondere Bedeutung hat. Die Fibrillen sind in Sarkoplasma eingelagert und stehen darin auch durch zarte Querfäserchen untereinander in Verbindung. Die Fibrillen nehmen in den Fasern eine zentrale Lage ein. Sie sind von reichlicherem Plasma umhüllt und in diesem liegen auch die Muskelkerne, die also innerhalb des Sarkolemms eine periphere Anordnung in der Muskelfaser zeigen. Die quergestreiften Muskelzellen der Darmwand haben nur je einen Kern, der bei den Ringzellen eine periphere, bei den Längszellen eine zentrale Anordnung zeigt. Von der Form der Zellen ist zu sagen, daß die Längszellen sich häufig verästeln, während die Ringzellen das nicht tun. Die Muskelelemente der Arthropoden sind Abkömmlinge des mittleren Keimblattes.

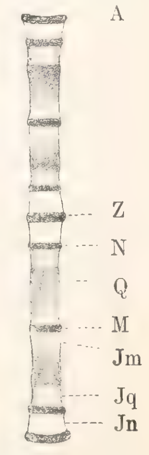


Fig. 12. Hydrophilus piceus, Fibrillensäulchen der Flügelmuskulatur, Erschlaffungsstadium. Z Zwischenstreifen, N Q M Cn Cg anisotrope, Jn Jg Jm isotrope Querstreifen. Nach K. C. Schneider. (Lit. 4, S. 505).

Wir unterscheiden die Rumpfmuskulatur mit den Muskeln der Kauwerkzeuge, der Flügel und der Extremitäten, ferner die Muskulatur des Darmkanals und diejenige des Gefäßsystems.

Die Muskulatur des Rumpfes bildet keinen einheitlichen Hautmuskelschlauch mehr, wie bei Würmern, sondern in Anpassung an die Ausbildung eines äußeren Chitinskelettes hat sich die Muskulatur zu einzelnen Muskelindividuen gesondert. Innere Fortsätze der Chitinglieder bieten für die Muskelfaserkomplexe Ursprungs- und Insertionspunkte. Im Kopf sind mächtige Kiefermuskeln ausgebildet, in der Brust sind bei Insekten Flügelmuskeln, teils längsteils senkrecht vom Rücken zur Brustfläche verlaufend. Bei Insekten mit Metamorphose wird im Puppenstadium das

Muskelgewebe der Larve von Wanderzellen zerstört, aufgelöst und es findet eine völlige Neubildung der Muskulatur des ausgebildeten Insektes statt, und zwar vom definitiven Mesoderm aus. Nur wenige Muskeln des zweiten Brustsegmentes bleiben erhalten und gehen unter geweblicher Umbildung in Flügelmuskeln des ausgebildeten Insektes über (Literatur 3 S. 871).

Die Muskulatur des Hinterleibs zeigt ein regelmäßig gegliedertes Verhalten, in Anpassung an die Chitinringe, an deren Grenzen die Muskelfasern ihren Ansatz nehmen.

Wie bei Insekten, so sind auch bei Krebsen in der Brust längs-, quer- und senkrecht verlaufende Muskeln als gesonderte Organe zu unterscheiden. Im Hinterleib (Schwanz) ist eine gegliederte Längsmuskulatur ausgebildet. Bei Krebsen ist die Rumpfmuskulatur aus vier längsverlaufenden Zügen hergestellt. Zwei liegen am Rücken und zwei am Bauche. Ringmuskeln fehlen, soweit sie nicht in die Extremitätenmuskeln übergegangen sind. Solche unterscheidet man als Vor- und Zurückzieher (Protraktoren und Retraktoren). Außerdem besteht innerhalb der Extremitäten eine komplizierte Muskulatur.

In der Darmwandung findet man bei Krebsen nur eine zarte Ringmuskulatur, bei Insekten kann man sehr komplizierte Längs- und Ringmuskeln unterscheiden. In der Wandung des Herzens der Arthopoden ist eine Ringmuskulatur ausgebildet.

3e) Echinodermen. Sie besitzen einen Hautmuskelschlauch aus epithelogener Muskulatur, dessen Elemente im allgemeinen längsverlaufend sind, doch ist auch eine äußere Ringmuskelschicht bei manchen Formen vorhanden. Es sind glatte Muskelfasern mit innerem Sarkoplasma, die Kerne liegen den Elementen seitlich an. Bei den Seesternen, den Seeigeln und Seewalzen ist das Muskelsystem, den allgemeinen Körperverhältnissen angepaßt, verschieden ausgebildet. Bei den festsitzenden Haarsternen entwickelt sich die Hautmuskulatur aus dem Ectoderm, bei allen anderen Formen aus dem mesodermalen Epithel. Bei Seesternen sind in den Armen mächtige Muskeln ausgebildet, welche mit den Kalkplatten der Haut in Verbindung stehen und dadurch ein gegliedertes Verhalten zeigen. Man unterscheidet ambulacrale Längs- und Quermuskeln, ferner schiefe Muskeln und Stachelmuskeln. Bei den Seeigeln, bei welchen die Kalkplatten der Haut unbeweglich miteinander verbunden sind, fehlen Längsmuskeln, doch finden sich außerhalb der Platten Muskeln, welche der Bewegung der Stacheln dienen. Bei Seewalzen besteht eine äußere kontinuierliche Ringmuskelschicht und eine innere sehr mächtige Längsmuskulatur, welche zu fünf Längszügen gesondert ist.

In der Wandung des Wassergefäßsystems sind Muskelzellen mesenchymatöser Art ausgebildet. Im Ringkanal und den Radiärkanälen sind sie ringförmig angeordnet und zeigen den Kern seitlich der kontraktilen Fibrille angelagert, in den Füßchen sind die Muskelzellen längsverlaufend und die Kerne liegen in die Fibrillen eingesenkt.

In den Mesenterien sind mesenchymatöse Längsmuskeln nachgewiesen.

Im Peritoneum finden sich Längs- und Ring-Muskelzellen, die zum Teil noch ganz primitiv, epithelial, wie bei Cnidariern sind. Bei abgelösten Muskelzellen liegen die Kerne den Fibrillen seitlich an.

Bei Seewalzen sind im Magen eine äußere Längs- und innere Ringmuskulatur ausgebildet, am Darmkanal bestehen sonst einfachere Verhältnisse.

In der Wandung der Geschlechtsschläuche ist eine äußere Längs- und innere Ringmuskelschicht erkannt.

3f) Mollusken. Sie besitzen vorwiegend mesenchymatöse Muskulatur und stehen den scoleciden Würmern, besonders den Nemertinen sehr nahe. Vielleicht sind nur einige Schalenmuskeln als epithelogen aufzufassen. Bekanntlich fehlt eine Metamerie gänzlich. Die mächtigen Schalenfußmuskeln sind von den Transversalmuskeln der Würmer abzuleiten.

Die Muskelelemente sind im allgemeinen glatte Muskelzellen, deren Enden sich in vielen Fällen gegen die Haut zu pinselartig auffasern. Die Kerne liegen den Fibrillen seitlich in der Mitte ihrer Länge an. Beim Schließmuskel unserer Muscheln (z. B. Anodonta) hat man an den Muskelelementen eine doppelte Schrägstreifung erkannt. Sie ist durch spiraligen Verlauf der Fibrillen veranlaßt. Die Kerne liegen im Innern zwischen den Fibrillen. Die Muskulatur der Herzwand besteht aus glatten spindelförmigen Muskelzellen mit zentral gelagertem Kern (Literatur 4 S. 548).

Anordnung der Muskulatur: Bei den Placophoren (Chiton) besteht ein Hautmuskelschlauch, der durch die Beziehung zu den segmentalen Schalenstücken sehr kompliziert gesondert ist; man unterscheidet Längsmuskeln, quere und schräge Muskeln. Auch eine komplizierte Gürtelmuskulatur gehört hierzu.

Den Transversalmuskeln der polychäten Würmer entsprechen seitliche Fußmuskeln, welche von der Unterfläche der Schalen entspringend abwärts zum Fuß ziehen, um an dessen ganzer Kriechfläche sich zu verteilen. Sie sind in seitliche, mittlere und innere Bündel gesondert. Längsmuskeln sind im Fuß nicht ausgebildet. In der Darm-

wand ist nur eine einfache Ringmuskulatur entwickelt.

Das Herz besitzt eine Muskulatur (Zellen, die sich durchflechten), die Blutgefäße nicht.

In der Umgebung der Geschlechtshöhle findet sich eine zarte Muskellage. Bei Lamellibranchiaten (Muscheln) bilden sich aus den Elementen des Hautmuskelschlauchs mächtige Schließmuskeln der Schale. Sie verlaufen quer und bestehen als vorderer und hinterer oder als ein mittlerer. Ferner gehören hierher noch Kantenmuskeln am Mantel.

Die Muskulatur des Fußes ist mesenchymatös und entspricht dem Transversalmuskel der polychäten Würmer. Man unterscheidet vorn einen Protraktor, Retraktor und Levator des Fußes, hinten einen Retraktor und außerdem quere Fußmuskeln. Am Darm unterscheidet man innere Längs- und äußere Ringmuskulatur.

Die Schnecken (Gastropoden) besitzen nach der neusten Auffassung keinen Hautmuskelschlauch. Ein mächtiger sogenannter Spindelmuskel entspringt von der Schalenspindel und strahlt in den Fuß aus, wo seine Fasern teils schräg, teils tangential verlaufend, pinselartig in die Oberhaut verlaufen.

3g) Brachiopoden. Sie besitzen in den Armen und im Mantel Muskeln, welche als Derivate des Hautmuskelschlauchs aufzufassen sind; außerdem sind Schalenmuskeln vorhanden, die zum Oeffnen, Schließen und zu Drehbewegungen der Schale dienen. Sie durchsetzen die Leibeshöhle in verschiedener Richtung und nehmen Ansatz an den Schalen. Man beurteilt sie auch als Derivate des Hautmuskelschlauchs (Gegenbaur Literatur 1).

3h) Cephalopoden. Bei ihnen findet sich eine reich entfaltete Muskulatur dem Innenskelett angepaßt. Zum Kopfknorpel treten zwei Retraktoren, die auch zum Trichter Fasern senden. Zum Trichter treten ferner vom Nacken entspringende Muskeln. Im Mantel und in den Flossen sind ebenfalls besondere Muskeln und endlich besitzen auch die Arme stark ausgebildete Muskulatur, welche einen in der Armachse verlaufenden Kanal einschließen. Die Muskulatur der Cephalopoden entwickelt sich aus dem Mesoderm und zwar aus den tieferen Schichten des unter dem Ektoderm gelegenen Teils.

3i) Tunicaten. Sie zeigen als Vorläufer der Wirbeltiere interessante Verhältnisse. Anlage der Muskulatur sind die Mesodermstreifen zu beiden Seiten der Wirbelsaite (Chorda dorsalis). Aus den Zellen des hinteren Teils geht die Muskulatur des Schwanzes der Larve hervor. Die Zellen strecken sich zu langen Sechsecken und es treten äußere und innere Fibrillen darin auf, die schräg verlaufend nach vorn konvergieren. Sie zeigen eine Andeutung von Querstreifung. Aus dem vorderen Teil des Mesoderms geht unter anderem die Muskulatur des Rumpfs hervor. Da hier das Mesoderm sich zu Mesenchym auflöst, hat die hier gebildete Muskulatur auch mesenchymatösen Charakter.

Die im Rumpf ausgebildete Muskulatur stellt ringförmige Züge dar, welche der Atemhöhle zugeteilt sind. Bei manchen Formen (Cyclomyarier, Thaliaceen) erreicht sie eine hohe Entfaltung. Die Muskulatur des Schwanzes ist stammesgeschichtlich deshalb von großer Bedeutung, weil hier in der Achse die Chorda liegt, dorsal davon das Nervensystem und ventral der Darm. Indem die Muskelmassen zu beiden Seiten in paariger Anordnung sich finden, besteht hier die gleiche Lagerung der Organsysteme wie bei Wirbeltieren. Bei manchen Tunicaten kommt der Schwanz nur der Larve zu und schwindet später, bei den Appendicularien bleibt er aber dauernd bestehen und die seitlichen bandartigen Muskeln nehmen einen gegliederten Charakter an. Bei einigen Formen hat man 10 Muskelglieder (Myomeren) nachgewiesen (vgl. Literatur 1, S. 603).

4. **Muskulatur der Wirbeltiere.** 4a) Allgemeines. Bei den Wirbeltieren besteht ein einheitlicher Plan im Aufbau des Muskelsystems. Wir unterscheiden zwei große Gebiete: 1. das Rumpfmuskelsystem (willkürliche Muskulatur, Skelettmuskulatur), dessen Elemente von den Nerven des Gehirns und Rückenmarks versorgt werden und 2. die Muskulatur der Eingeweide (unwillkürliche Muskulatur), welche vom sympathischen Nervensystem ihre Nerven bezieht. Die Elemente der Rumpfmuskulatur sind alle quergestreift und nur bei Amphioxus vielleicht Zellen, bei allen höheren Wirbeltieren sind es vielkernige Gebilde, Syncytien. Die stammesgeschichtlich ältesten dieser Elemente sind Muskelbänder oder -kästchen. Durch Zerteilung derselben entstehen die Muskelfasern, die verbreitetsten Elemente der Rumpfmuskulatur. Sie zeigen in ihrer feineren Struktur mannigfaltige Verschiedenheiten (vgl. Literatur 17).

Die Elemente der Eingeweidemuskulatur sind mit wenigen Ausnahmen glatte Muskelzellen. Nur die Muskulatur des Herzens besteht bei allen Wirbeltieren aus quergestreiften Muskelzellen, und ferner finden sich quergestreifte Muskelzellen in der Darmwand einiger Fische. Glatte Muskelzellen kommen übrigens auch in der Haut vieler Wirbeltiere vor, diese nehmen hinsichtlich ihrer Entstehung eine Sonderstellung ein.

4b) Entwickelung der Muskelelemente (vgl. Literatur 16 S. 76). Alle Muskelelemente der Wirbeltiere nehmen ihre Ent-

stehung vom Mesoderm, nur gewisse in der Haut einiger Formen befindliche glatte Muskelzellen sind Abkömmlinge des äußeren Keimblattes. Die Rumpfmuskulatur geht hervor aus den Urwirbeln, die, zu beiden Seiten der Rückensaite (Chorda dorsalis) gelegen, die ersten gegliederten Bestandteile des Wirbeltierembryos sind. Die Urwirbel sind die obere (dorsale) Hälfte des vom inneren Keimblatte aus gebildeten mittleren Keimblattes, dessen untere (ventrale) Hälfte durch die Seitenplatten dargestellt wird. Nur die innere (mediale), der Chorda zugewendete Lamelle der Urwirbel liefert die Skelettmuskulatur, man hat sie als das Muskelblatt des Urwirbels bezeichnet. Die

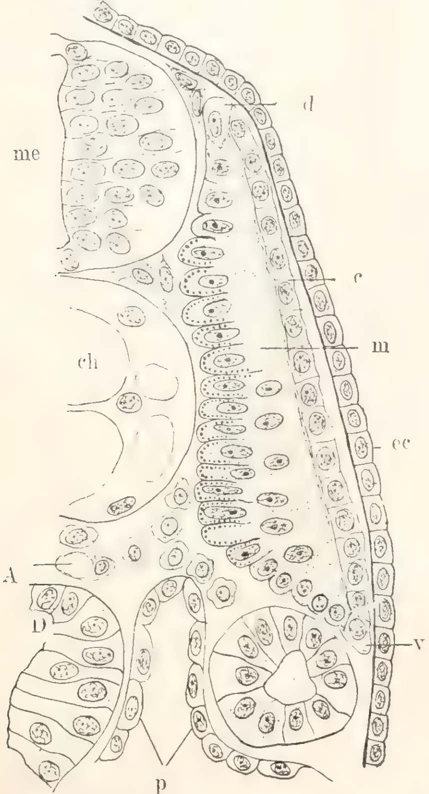


Fig. 13. Petromyzon fluviatilis. Embryo 3 mm lang. Querschnitt des 5. rechten Rumpfsegments. d dorsale, v ventrale Kante des Myotoms, me Rückenmark, ch Chorda, A Aorta, D Darm, p Parietalplatten, m Muskelblatt mit basalen Fibrillen, Anlage der Bänder, c Cutisblatt, ec Ektoderm. Nach Maurer, Literatur 17.

äußere Lamelle liefert das Bindegewebe der Lederhaut. Die Seitenplatten scheinen im Rumpfe keine Muskelelemente zu bilden. Im Kopfe bestehen keine Urwirbel, das Medoserm des Kopfes erfährt eine frühzeitige Zerteilung, aber aus seinen Elementen gehen im Kopfe ebenfalls den Rumpfmuskeln äquivalente Muskeln, nämlich diejenigen des Auges und des Kiefer- und Kiemenapparates hervor. Die Urwirbel besitzen eine epitheliale Wandung, die daraus hervorgehenden Muskelelemente sind also epithelogene Muskeln. Die ersten kontraktilen Fibrillen treten in dem basalen der Chorda zugekehrten Teil des Muskelblattes in einfacher Reihe auf. Bei Amphioxus wachsen die Muskelzellen zu Bändern aus, deren Kerne seitlich, d. h. von der Chorda abgewandt liegen. Bei Cyclostomen bilden sich aus dem Muskelepithel mehrkernige Muskelbänder, welche zuerst einen einfachen peripheren Mantel von Fibrillen besitzen und Sarkoplasma mit Kernen im Inneren zeigen. Bald werden die Fibrillen mehrschichtig und füllen das ganze Muskelband. Die Kerne liegen dann zwischen den Fibrillen im Sarkoplasma verteilt.

Man kann diese Muskelbänder den epithelogenen Muskelbändern und -kästchen der Cölenteraten und Würmer im allgemeinen vergleichen, wenn man berücksichtigt, daß es sich auch hier um die Bildung von Muskelbändern aus Muskelepithel handelt und daß die ersten Fibrillen im basalen Teile der Epithelzellen entstehen. Auch hier findet ein Auswachsen des Muskelepithels zu lamellösen Epithelbezirken statt, die Oberfläche der Bänder entspricht der basalen Fläche des Epithels. Während bei Ammocötes die Muskelbänder bestehen bleiben, erfahren diese bei Petromyzon den Beginn einer weiteren Zerklüftung, die sich aber auf die oberflächlichsten Fibrillen im einzelnen Band beschränkt. Ein jedes Band zeigt an der Oberfläche eine einfache Lage drehrunder Muskelfasern, während im Innern noch eine einheitliche Fibrillenmasse des Bandes erhalten ist. Bei Myxinoiden aber ist der Zerklüftungsprozeß weitergegangen und die ganzen Muskelbänder sind zwar noch deutlich abgrenzbar, aber sie bestehen aus einer großen Anzahl einzelner drehrunder Muskelfasern, die in ihrem Bau ganz den quergestreiften Muskelfasern höherer Wirbeltiere gleichen (vgl. Literatur 17). Auch bei allen höheren Wirbeltieren läßt sich bei der ersten Ausbildung der Muskelfasern aus dem Muskelblatt der Urwirbel noch eine Andeutung einer ersten Faltenbildung des Muskelepithels und damit einer Bänderbildung erkennen. Bei Ganoiden (dem Stör) bilden sich embryonal sogar noch deutliche Bänder aus. Wir können deshalb die Muskelbänder der Wirbeltiere als Muskelepithelbezirke erster Ordnung auffassen, dann sind die Muskelfasern solche Bezirke zweiter Ordnung und ihre Oberfläche entspricht der Basalfläche des Epithels. Später bilden sich Muskelfasern in den verschiedenen

Abschnitten des Körpers, aber alle von den Urwirbeln dahin gelangt, in einfacherer Weise aus (vgl. Literatur 20 und 25): entweder durch Auswachsen einer Zelle unter fortgesetzter Teilung des Kernes und Einheitlichbleiben der Plasmamasse, in welcher Fibrillen zur Ausbildung kommen, oder durch Aneinanderlagern und Verschmelzung mehrerer Myobastenzellen zu einer einheitlichen Faseranlage. Die Fibrillen bilden sich dabei entweder als ein peripherer Fibrillenmantel aus (Selachier, Säugetiere) oder sie entstehen einseitig neben dem Kern (Knochenfische, schwanzlose Amphibien).

Die Elemente der Eingeweidemuskulatur nehmen ihre Entwicklung von freien Zellen des Bindegewebskeims allenthalben an den Stellen, an welchen man sie findet. Man nimmt an, daß durch Arbeitsteilung ein Teil der Zellen des indifferenten Bindegewebskeims zu Bindegewebe, ein anderer Teil aber zu kontraktilen Zellen sich ausbildet. In der Haut der Amphibien und der Säugetiere findet man Muskelzellen in unmittelbarem Anschluß an gewisse Hautdrüsen. Diese kontraktilen Elemente faßt man als Abkömmlinge des Oberhautepithels also des äußeren Keimblatts auf mit Rücksicht darauf, daß erst unter ihnen die Grenzmembran liegt, welche das Epithel vom Bindegewebe trennt. Vielleicht nehmen auch andere glatte Muskelzellen der Haut vom äußeren Keimblatt ihre Entstehung.

4c) Bau der Muskelelemente. Die glatten Muskelzellen sind spindelförmige Elemente, die Zellkörper spitz ausgezogen, bald drehrund, bald bandförmig, an Länge sehr verschieden. Der stäbchenförmige Kern liegt in der Mitte und ist an beiden Enden abgerundet. An den beiden Polen des Kerns findet sich eine geringe Menge feinkörnigen Plasmas, im übrigen besteht der Zellkörper aus kontraktiler Substanz und erscheint in vielen Fällen mattglänzend und homogen, weshalb man die Gebilde als glatte Zellen bezeichnet hat; meist läßt sich eine feinste Längsstreifung erkennen als der Ausdruck einer fibrillären Struktur. An manchen Stellen findet man auch drei- und mehrstrahlige glatte Muskelzellen (z. B. Harnblase der Amphibien).

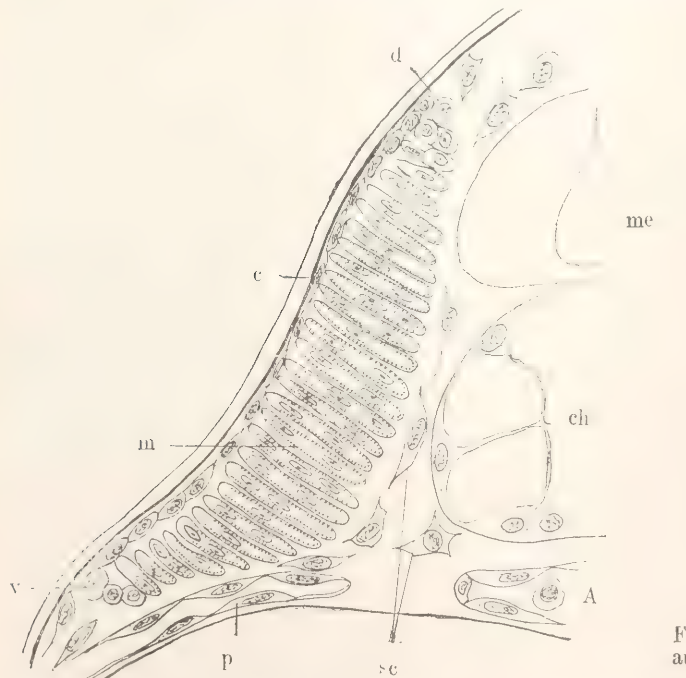


Fig. 14. Petromyzonlarve, 6 mm lang. Querschnitt der linken dorsalen Rumpfhälfte. m Muskelbänder, vgl. d. Fig. 13, sc Bindegewebszellen. Literatur 17.

Fig. 15. Glatte Muskelzellen aus der Darmwand eines Salamanders.

Quergestreifte Muskelzellen finden sich ganz allgemein in der Muskelwand des Herzens sämtlicher Wirbeltiere. Es sind kurze spindelförmige oder zylindrische Zellen, die sich kettenartig aneinander schließen. Bei den höheren Wirbeltieren und dem Menschen sind sie im erwachsenen Zustand zylindrisch,

bilden Ketten. Dadurch aber daß die einzelnen Zellen seitliche kurze, sogenannte treppenartige Fortsätze besitzen, treten die Ketten auch in seitlichen Zusammenhang und stellen ein Netzwerk her. Auch hier liegt der Kern zentral und zeigt an den Polen körniges Plasma, der Zellkörper ist aber nicht glatt,

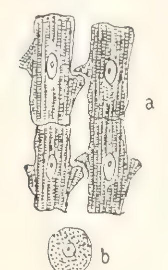


Fig. 16. Quergestreifte Muskelzellen aus der Herzwand eines Säugetiers. b im Querschnitt.

sondern die kontraktile Substanz läßt zwei Bestandteile unterscheiden: helles Sarkoplasma und darin eingelagert feinste Fibrillen, die eine feine Querstreifung erkennen lassen: sie bestehen aus regelmäßig abwechselnden Schichten einfach- und doppeltlichtbrechender Substanz. Diese höhere Ausbildung der Fibrillen faßt man auf als eine Anpassung an die hohe Leistung, die dem Herzmuskel zukommt.

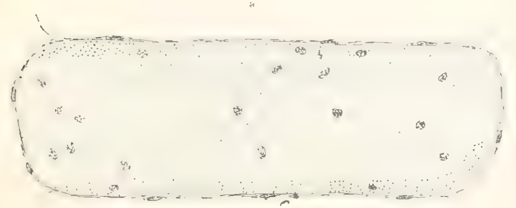


Fig. 17. Querschnitt durch ein Muskelband von Ammocoetes. Literatur 17.

Die Muskelbänder des Amphioxus sind sehr schmale und kurze Gebilde, ohne eigene Hülle. Der Kern liegt seitlich, jedes Band besitzt eine doppelte Reihe von Fibrillen, die eine nicht sehr deutliche Querstreifung zeigen.

Viel komplizierter sind die Muskelbänder oder -kästchen der Cyclostomen gebaut. Es sind sehr breite und dicke bandartige Gebilde, umgeben von einer feinen elastischen Membran, die sie ganz umschließt: dem Band-Sarkolemma (Fig. 17). Im Inneren findet sich Sarkoplasma, das dicht erfüllt ist von feinen im Querschnitt punktförmigen Fibrillen, die quergestreift sind. Die Fibrillen sind in konzentrischen Zonen angeordnet, die man als Wachstumszonen auffaßt. Zwischen den Fibrillen liegen in großer Zahl stäbchenförmige Kerne allenthalben zerstreut: innere Muskelkerne; auch an der Peripherie, der Innenfläche des Sarkolemms dicht angelagert finden sich Kerne: äußere Muskelkerne. An den Muskelbändern von Petromyzon ist an der Oberfläche durch eindringendes Bindegewebe eine einfache Lage von rundlichen Fibrillenkomplexen abgegrenzt (Fig. 18). Sie bilden Randfasern, die in ihrem Bau mit quergestreiften Muskelfasern übereinstimmen. Sie besitzen nur äußere Muskelkerne. Innerhalb der Randfasern sind die Fibrillen auch in Gruppen angeordnet, aber diese sind nicht durch Sarkolemm abgeschlossen, so daß man noch nicht von Muskelfasern sprechen kann. Bei Myxinoiden sind die Bänder durch Bindegewebe abgegrenzt, aber im Inneren findet man mit Sarkolemm versehene quergestreifte Muskelfasern (Fig. 19).

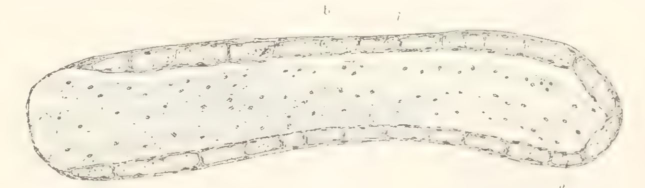


Fig. 18. Querschnitt eines Muskelbands von Petromyzon. p Parietalfasern. Beginn einer Zerklüftung. Literatur 17.

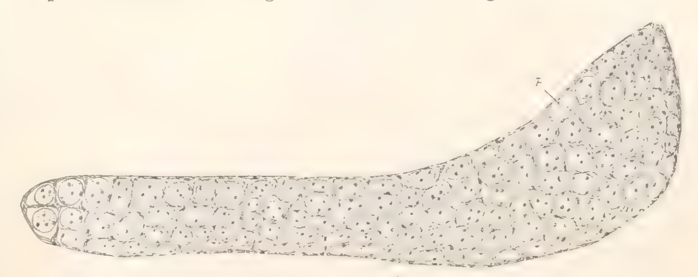


Fig. 19. Querschnitt durch ein Muskelband von Myxine zu Fasern zerklüftet. Literatur 17.

Die quergestreiften Muskelfasern zeigen eine sehr verschiedene Länge und sehr verschiedene Dicke im gleichen Muskel. Sie sind alle von einer zarten elastischen strukturlosen Membran, dem Sarkolemma umschlossen. An den Enden sind sie leicht konisch oder schräg abgestutzt. Innerhalb des Sarkolemms findet man Sarkoplasma, eine helle flüssige Masse, oft mit zahlreichen Körnchen durchsetzt. Darin liegen die feinen

quergestreiften Fibrillen, bald drehrund, im Querschnitt punktförmig, bald bandförmig, im Querschnitt lanzettförmig. Bald erfüllen sie die Faser gleichmäßig, bald sind sie zu Gruppen, Muskelsäulchen, gesondert (Cohnheimsche Felder). Die zahlreichen Kerne finden sich bald als innere Muskelkerne im Sarkoplasma zwischen den Fibrillen, bald liegen sie als äußere oder Sarkolemmakerne der Innenfläche des Sarkolemmas an. Bei Säugetieren und dem Menschen findet man in der Jugend beiderlei Kerne, im erwachsenen Zustand meist nur Sarkolemmakerne in den Muskelfasern (vgl. Literatur 17, 22).

Die Fibrillen bestehen aus abwechselnden Schichten einfach und doppeltlichtbrechender Substanz (isotroper und anisotroper Substanz). Man hat außerdem noch feinere Abschnitte in den beiden Substanzlagen unterschieden: z. B. eine Zwischenscheibe in der isotropen und eine Mittelscheibe in der anisotropen Substanz. Je nach der komplizierteren Struktur, die offenbar mit der verschiedenen Inanspruchnahme eines Muskels in Beziehung steht, hat man Querstreifung I. und II. Grades unterschieden (vgl. Literatur 4, S. 333, 502, 597, 809). Die Fibrillen in einer Muskelfaser bezeichnet man als Primitivfibrillen, eine Muskelfaser ist ein Fibrillenbündel erster Ordnung. Je nach der Anordnung der Fibrillen, nach der mehr oder weniger reichlichen Ausbildung des Sarkoplasmas und nach der Anordnung der Kerne hat man sehr verschiedene Formen der Muskelfasern beschrieben: es sei nur erwähnt Protoplasmaarme und Plasmareiche,

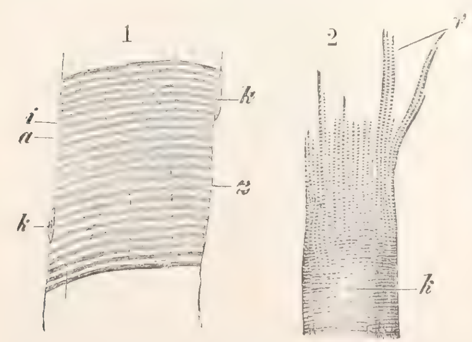


Fig. 20. 1 Stück einer quergestreiften Muskelfaser vom Menschen. a anisotrope, i isotrope Querbänder, z Zwischenscheibe, k Kerne (Zerfall in Fibrillen), 2 Muskelfaserstück vom Frosch.

rote und blasse Muskulatur (vgl. Literatur 22). Auch bei diesen Verschiedenheiten spielt die Leistung eines Muskels eine Rolle. Man kann eine Muskelfaser leicht in ihre Bestandteile zerlegen: durch Behandlung mit Alkohol oder Pikrinsäure kann man die Muskelprimitivfibrillen isolieren, indem das Sarkoplasma aufgelöst wird; durch Behandlung mit schwacher Salzsäure gelingt es, die Faser in quere Scheiben zu zerlegen (Bowmans Discs). Durch Zerteilung in doppeltem Sinne erhält man die sogenannten Fleischprismen (Sarkous Elements). Bei den höheren Wirbeltieren setzt sich jede Muskelfaser in ein Sehnenfibrillenbündel fort; in letzter Zeit ist ein kontinuierlicher Uebergang jeder Muskel- in eine Sehnenfibrille erkannt worden. Die Sehnen vermitteln die Verbindung der Muskelfasern mit dem knöchernen Skelett.

4d) Die Anordnung des Muskelsystems aus seiner Entwickelung: Die erste Anlage des Rumpfmuskelsystems ist dargestellt durch die Summe der paarigen Urwirbel (Myotome); diese nehmen eine obere, dorsale Lage ein zu beiden Seiten des Rückenmarks und der Chorda (Wirbelsaite). Indem jeder Urwirbel an seiner oberen (dorsalen) wie an seiner unteren (ventralen) Kante einen Vegetationspunkt erhält, von welchem Fortsätze auswachsen, vermehren sich die Muskelbildungszellen nach oben wie nach unten. Von besonderer Bedeutung werden die abwärts wachsenden, sogenannten ventralen Myotomfortsätze, insofern sie Muskelbildungsmaterial in die ventrale oder Bauchregion des Körpers bringen. Von diesen ventralen Myotomfortsätzen gelangen in der Brust und Lendenregion von einer größeren Anzahl von Urwirbeln aus knospenartige Sprossen in die Anlagen der Extremitäten hinein und bilden das Material für die gesamte Muskulatur der Extremitäten (vgl. Literatur 21). Auch die bei Fischen überall ausgebildeten Muskeln der unpaaren Flossensäume nehmen ihren Ursprung von den dorsalen oder ventralen Urwirbelkanten aus. Die Muskulatur des Kopfes bildet sich nicht von den Urwirbeln, sondern selbständig vom Mesoderm des Kopfes aus. So ergibt sich eine natürliche Einteilung des Muskelsystems, die, nach den Körperregionen vorgenommen, auch in der Entwickelung eine Begründung findet. Man unterscheidet die Muskulatur des Kopfes, diejenige des Rumpfes und die der Extremitäten. Die Muskulatur des Schwanzes ist eine Fortsetzung der Rumpfmuskulatur.

4e) Bau des Muskels und seine Hilfsapparate: Die Muskelfasern bilden bei Fischen und Amphibien vielfach gleichmäßig dem ganzen Rumpf angelagerte Massen, die noch eine Aehnlichkeit mit dem Hautmuskelschlauch der Würmer zeigen. Außerdem aber gliedern sich auch scharf gesonderte Komplexe von Muskelfasern ab, indem sie zu Skeletteilen in Beziehung treten, die sie bewegen. Das findet sich besonders frühzeitig am Kopf, wo im Dienste des Auges und des Kiefer-Kiemenapparates ein sehr

komplizierter Muskelapparat besteht. Solche Muskelfaserkomplexe bezeichnet man als Muskeln. Diese sind Organe und bestehen als solche nicht nur aus Muskelfasern, sondern lassen noch andere Bestandteile unterscheiden. Am Aufbau eines Organes sind immer sehr verschiedenartige Gewebe beteiligt. Jeder Muskel ist äußerlich abgegrenzt durch eine bindegewebige Hülle: die Fascie oder Muskelbinde. An diese schließt sich gegen den Muskel zu noch eine zartere Bindegewebsschicht an: das Perimysium. Dieses sogenannte äußere Perimysium setzt sich zwischen die Muskelfasern ins Innere des Organs fort, seine einzelnen Muskelfasern umspinnend: es ist das innere Perimysium oder das interstitielle Bindegewebe des Muskels. Alle diese Teile des Muskels bestehen aus lockerem faserigem Bindegewebe. In Begleitung des Perimysiums treten ferner die markhaltigen Nervenfasern in den Muskel ein. Im Bindegewebe zwischen den Muskelfasern sich verzweigend gelangen sie zu den Muskelfasern, so daß jede Muskelfaser eine markhaltige Nervenfaser erhält, die an ihr endigt in Form einer motorischen Nervenendplatte. Im allgemeinen tritt jede Nervenfaser in der Mitte der Muskelfaser an diese heran. In neuerer Zeit hat man zu jeder Muskelfaser außer dieser motorischen noch eine andere Nervenfaser von unbekannter Bedeutung, in einfacherer Weise endigend, gefunden. In den Muskeln vieler Wirbeltiere (Amphibien, Reptilien, Säugetiere) sind von Kölliker (vgl. Literatur 9, S. 394 Bd. I) spindelförmig verdickte Fasern gefunden worden (Muskelspindeln), bei welchen reichliche Massen von Kernen und eine voluminöse Ausbildung der Nervenendigungen bestehen. Ihre Bedeutung ist noch nicht klar. An der Bildung einer Spindel sind meist mehrere Muskelfasern beteiligt. Vielleicht handelt es sich um Neubildung von Muskelfasern aus dem Material der alten. Im interstitiellen Bindegewebe verlaufen außer den Nerven auch die Blutgefäße des Muskels. Zu jedem Muskel treten eine oder mehrere Arterien, sie verzweigen sich zu feinsten Aestchen, die schließlich in ein, die einzelnen Muskelfasern umspinnendes Kapillarnetz übergehen. Aus diesem sammeln sich, ebenfalls im Perimysium verlaufende Venen, welche das Blut aus dem Muskel herausführen. Mit den Blutgefäßen treten auch sympathische Nerven zum Muskel. Ferner sind als wichtige Hilfsorgane des Muskels die Sehnen zu nennen, welche die Verbindung des Muskels mit den Skeletteilen vermitteln. Sie bestehen aus straffem faserigem Bindegewebe.

Die Muskeln haben eine sehr verschiedene Form, je nach ihrer Anordnung im Körper. Am Rumpf zeigen sie häufig eine flächenhafte Ausbreitung, bilden Muskelplatten, an den Extremitäten sind sie dagegen meist spindelförmig. Jeder Muskel besitzt zwei Ansätze, die man als Ursprung (Origo) und Insertion unterscheidet. Der Ursprung ist das Punctum fixum, die Insertion das Punctum mobile.

Anatomisch wird der der Körperachse näher gelegene Ansatz als Ursprung, der entfernt gelegene Ansatz als Insertion bezeichnet. In der Regel hat jeder Muskel nur einen Muskelbauch. Es kommt aber auch vor, daß ein Muskelbauch sich in eine Sehne fortsetzt, die wiederum in einen Muskelbauch übergeht; der letztere tritt erst zur Insertion. Solche Muskeln sind zwei- oder mehrbauchige Muskeln (Musc. biventer). Sind die die einzelnen Bäuche trennenden Zwischensehnen sehr kurz, so nennt man sie Inscriptiones tendineae. Wenn von verschiedenen Teilen des Skeletts entspringende Faserkomplexe zu einer einzigen Endsehne treten, so spricht man von zwei- und mehrköpfigen Muskeln (Musc. biceps, triceps, quadriceps). Der einheitliche Muskelbauch kann aus parallel verlaufenden Fasern bestehen, oder die Fasern zeigen innerhalb des Muskels schrägen Verlauf, sind sehr kurz, aber sehr zahlreich. Die Sehne erstreckt sich zwischen die Fasern weit hinein. So entstehen halb-, einfach oder mehrfach gefiederte Muskeln. Durch die Vermehrung der Fasern wird die Leistung eines Muskels erhöht. Die Art der Inanspruchnahme eines Muskels bedingt seinen feineren Bau. Die Energie eines Muskels ist durch die Zahl seiner Muskelfasern bestimmt.

4f) Wirkung der Muskeln. Die Tätigkeit eines Muskels besteht in der Verkürzung seiner Fasern. Dadurch werden Ursprung und Insertion einander genähert. Bei allen höheren Wirbeltieren, bei welchen die Muskeln an Skeletteilen ihre Ansätze nehmen, dienen die Muskeln der Bewegung des Skeletts. Die Wirkungen hat man unterschieden als Beugung (Flexio), Streckung (Extensio), Drehbewegungen (Rotatio, Pronatio und Supinatio), seitliche Bewegung (Ab- und Adductio). Häufig hat ein Muskel eine Hauptwirkung, daneben aber auch Nebenwirkungen. In der Regel wird bei den Bewegungen des Körpers oder der Extremitäten nicht nur ein, sondern eine Gruppe von Muskeln in Anspruch genommen (coordinierte Bewegungen). Muskeln, welche in gleichem Sinne wirken, sind Synergisten, Muskeln, welche entgegengesetzte Wirkung haben, sind Antagonisten. Beuger sind Antagonisten von Streckern, bei der seitlichen Bewegung können aber Beuge- und Streckmuskeln Synergisten werden.

Bei stärkerem Gebrauch vermehren sich

die Fasern eines Muskels und er bedarf dann einer größeren Ursprungsfläche. Dabei breitet sich der Muskel aus und gewinnt neue Ansatzstellen. Bei solcher Wanderung des Muskels kann er alle ihm begegnenden Teile in Anspruch nehmen; der Muskel ist omniserent (vgl. Literatur 12, II. Teil S. 951ff.). Am häufigsten werden dabei die Fascien ergriffen, die dann den Charakter von Ursprungssehnen annehmen, sie werden zu Aponeurosen. Viele Fortsätze an Knochen: Leisten (Cristae), Höcker (Tubercula) sind als Oberflächenvergrößerungen durch Muskel- oder Sehnenansatz zu beurteilen, weshalb man sie geradezu als Muskelfortsätze der Knochen bezeichnet. So wirken die Muskeln auch auf die Gestaltung des Skelettes. Auch für die Bildung der Gelenke ist die Muskulatur von maßgebender Bedeutung.

4g) Muskel und Nerv (vgl. Literatur 12, II. Teil S. 869ff.). Die Anlage des Muskelsystems setzt sich aus vielen Gliedern, den Kopfsegmenten und den Urwirbeln des Rumpfes zusammen. Jedes solche Glied erhält auch einen Gehirn- oder Rückenmarksnerven, die eine genau entsprechend gegliederte Anordnung zeigen. Alle Muskeln, welche in der weiteren Entwickelung aus einem Urwirbel hervorgehen, werden immer von dem Nerven ihres Segmentes versorgt. Wenn also ein Muskel durch Wanderung eine noch so weit gehende Verlagerung erfährt, so nimmt er immer seinen Nerven mit. Daraus ergibt sich, daß die Innervation eines Muskels von größter Bedeutung für seine morphologische Beurteilung ist. Dies ist u. a. wichtig zum Verständnis des Zwerchfells der Säugetiere, des Kehlkopfes, sowie bei vielen Muskeln der Brust, des Rückens und der Extremitäten, und vor allem bei der mimischen Gesichtsmuskulatur. Im allgemeinen tritt ein Nerv immer zur Mitte eines Muskelbauchs und verbreitet sich im interstitiellen Bindegewebe, so daß zu jeder Muskelfaser eine Nervenfaser gelangt.

4h) Anordnung der fertiggebildeten Muskulatur. α) Muskulatur des Kopfes. Am Kopfe sind 2 Muskelgebiete zu trennen, 1. die Muskeln des Auges und 2. die Muskeln des Kiefer-Kiemenskelettes.

Am Kopfe sind bei Haifischen 13 Segmente den Urwirbeln des Rumpfes entsprechend nachgewiesen worden, die sich frühzeitig auflösen und in bis jetzt unbekannter Weise am Aufbau der Kopforgane beteiligen (vgl. Literatur 2, S. 38). Dann treten aber 4 Kopfsegmente auf, deren erstes das Material für einige Augenmuskeln liefert. Außer diesen oberen, dorsalen Kopfsegmenten besteht im Kopfe auch ein unteres, ventrales Mesoderm, das den Seitenplatten des Rumpfs entspricht. Dieses ventrale Mesoderm ist am Kopf im Gegensatz zum Rumpf ebenfalls gegliedert infolge der Kiemenspalten, welche die ventrale Kopfwandung durchsetzen und einzelne Abschnitte, die sogenannten Schlundbogen, voneinander trennen. Die Schlundbogen unterscheidet man: den ersten als Kieferbogen, den zweiten als Zungenbeinbogen und die weiteren als 1., 2. usw. Kiemenbogen. Außer den Muskeln des Auges besteht nun an jedem Schlundbogen eine komplizierte Muskulatur, die zum Teil von dem ventralen Mesoderm des Kopfes abstammt. Jedem Schlundbogen entspricht ein Nerv, so daß auch hier aus der Innervation die Muskulatur beurteilt werden kann. Man hat diese Muskulatur als die viscerale bezeichnet.

Am Auge unterscheiden wir bei allen Wirbeltieren 4 gerade und 2 schiefe Muskeln, die Musculi recti und obliqui. Von dem äußeren geraden sondert sich bei Amphibien und Reptilien ein Retractor bulbi, Zurückzieher des Auges ab, bei Vögeln bildet er den Nickhautmuskel, auch bei Säugetieren ist der Retractor sehr verbreitet, bei Affen und dem Menschen rückgebildet. Aus dem oberen Rectus sondert sich ein Heber des oberen Augenlids (vgl. Literatur 2 S. 40).

Drei Nerven versorgen die Augenmuskeln: Oberer, unterer, innerer gerader und unterer schiefer werden vom 3. Gehirnnerven, dem Oculomotorius, der obere schiefe vom 4. Gehirnnerven, dem Trochlearis, und der äußere gerade Muskel mit seinen Sonderungen vom 6. Nerven, dem Abducens versorgt. Die Oculomotoriusmuskeln bilden sich aus der Wandung des ersten Kopfsegmentes und auch die Abducensmuskeln gehen von einem Kopfsegment hervor, entsprechen also Urwirbelmuskeln des Rumpfes, während der Trochlearismuskel aus dem ventralen Mesoderm des Kopfes, den Seitenplatten des Rumpfes entsprechend hervorgeht.

Diese Muskulatur führt die Bewegungen des Augapfels aus, die sehr komplizierte koordinierte Bewegungen sind, da z. B. die Auf- und Abwärtsbewegung stets von je 2 Muskeln ausgeführt wird. Die Muskeln entspringen an der Wand der Augenhöhle und inserieren an der äußeren Schicht (Sclera) des Augapfels.

Muskulatur des Visceralskelettes. Bei Amphioxus bilden sich in der Kiemenregion des Darmes 2 Muskelgruppen unabhängig von den Rumpfmuskelsegmenten, nämlich ein Musculus transversus in der Wand des Peribranchialsackes und ferner eine Mundringmuskulatur.

Bei Cyclostomen besteht ein mächtiger Zungenmuskel, welcher von einem dem Kieferbogennerven (Trigeminus) der höheren Wirbeltiere entsprechenden Nerven versorgt wird. Ferner finden sich zwischen je 2 Kiemenbogen Schnürmuskeln (Constrictoren) und Anzieher (Adductoren), die vom Meso-

derm in jedem Bogen, unabhängig von den Urwirbeln gebildet werden. Der ganze Kiemenapparat ist hier weit nach hinten in den Rumpfteil ausgedehnt, so daß er wie bei Amphioxus von Rumpfmuskelsegmenten weit überlagert wird (Literatur 1).

Bei allen höheren (gnathostomen) Wirbeltieren wird die Muskulatur der Kiemenregion einerseits nach den einzelnen Kiemenbogen, andererseits nach den Nerven, von welchen sie versorgt werden, eingeteilt. Die Muskulatur des Kieferbogens ist die des Trigeminus des 5. Gehirnnerven. Diejenige des Zungenbeinbogens wird vom Nervus facialis, dem 7. Gehirnnerven versorgt. Dann folgen die Gebiete des 9. (Glossopharyngeus) und 10. (Vagus), welche die Muskeln der hinteren Kiemenbogen versorgen. Diesen Gehirnnervengebieten schliessen sich aber Muskeln an, welche erst später Beziehungen zum Kopf erworben haben, ursprünglich Rückenmarksnervenmuskeln waren (vom Nervus hypoglossus innerviert). Sie werden von Fürbringer als epi- und hypobranchiale Muskeln unterschieden (vgl. Literatur 13).

So hat man an den einzelnen Kiemenbogen Muskeln von zweierlei Herkunft zu unterscheiden, die sich zwischeneinander geschoben haben. Zu den Gehirnnervenmuskeln gehören Schnürer und Anzieher (Constrictoren und Adductoren), die sich auf jeden einzelnen Bogen beschränken, zu den Rückenmarksnervenmuskeln gehören von Bogen zu Bogen längs oder schräg verlaufende Musculi interarcuales. Auch obere quere Muskeln (Musc. spinalis) gehören zu dieser Gruppe.

Bei den Selachiern sind sowohl die epi- wie die hypobranchialen Muskeln sehr mächtig entwickelt, während bei allen höheren Wirbeltieren nur die hypobranchialen Muskeln in reicher Entfaltung bestehen (vgl. Literatur 1 u. 13).

Aus den Muskeln des Kieferbogens entwickeln sich die Kaumuskeln in der ganzen Reihe der Wirbeltiere, bei einem einheitlichen Plan doch in den verschiedenen Klassen mannigfaltige Anpassungen an spezielle Verhältnisse erkennen lassend. Erwähnt sei, daß bei Säugetieren und dem Menschen auch der kleine zum Hammer des Gehörorgans tretende Muskel, der Tensor tympani, zu dieser Muskelgruppe gehört. Ventral kommt noch eine intermandibulare Muskulatur zur Ausbildung, die sich an Muskeln des Kieferbogens anschließt. Die vom Facialis innervierte Muskulatur des Zungenbeinbogens läßt ebenfalls eine komplizierte Ausbildung erkennen. Hier sind außer kleinen auf den Bogen beschränkten Muskeln besonders die Constrictoren von Bedeutung, weil sie bei höheren Formen eine weitere Ausbreitung erfahren. Bei Amphibien besteht schon ein Schnürer des Halses (Sphincter colli). Er erreicht bei Reptilien eine stärkere Entfaltung nach hinten zu und bei Säugetieren sondert er sich in 2 Schichten, die als Sphincter colli und Platysma unterschieden werden und sich auf das ganze Antlitz ausbreiten, wo ihre Fasern an Skeletteilen entspringend, in der Haut des Gesichts inserieren (vgl. Literatur 14 u. 15). Sie stellen die mimische Gesichtsmuskulatur dar, sie sich um Mund, Nase, Auge und Ohr, sowie auf das Schädeldach ausbreitet und eine außerordentliche Sonderung in zahlreiche Muskeln erfährt. Das Platysma überlagert auch den ganzen Hals, während hier der Sphincter colli rückgebildet ist. Das Facialisgeflechte im Gesicht zeigt noch den Weg der Muskelwanderung. Zu den Facialismuskeln gehört auch der kleine zum Steigbügel des Gehörorgans verlaufende Musc. stapedius. Er bildet sich aus Teilen einer tiefen Constrictorlage.

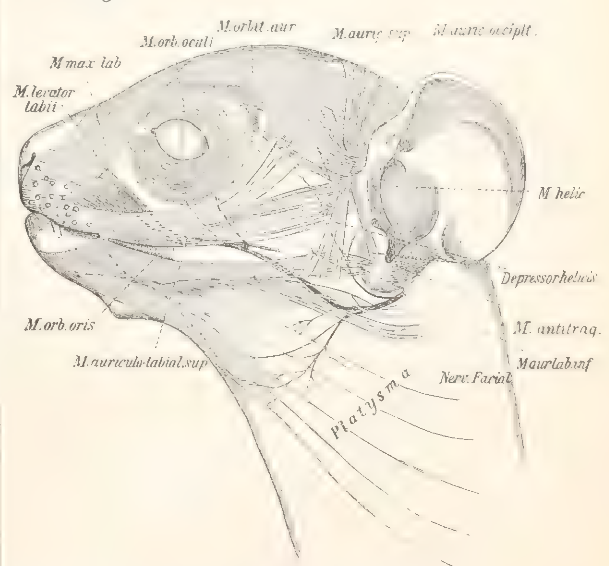


Fig. 21. Gesichtsmuskeln und -nerven von Propithecus. Oberflächliche Muskellage mit den Verzweigungen des Facialis. Nach Ruge. Die Namen der einzelnen Muskeln sind aus der Figur ohne weiteres ersichtlich. Nach Ruge.

Die Muskeln der hinteren Kiemenbogen, vom Glossopharyngeus und Vagus innerviert, sind, wie oben angeführt, zu unterscheiden und wiederholen sich an allen Bogen. Bei Amphibien finden sich ventral stärkere Muskeln (Cerato-hyoidei). Kleinen Hebern der Bogen, die nur bei Selachiern bestehen, entstammt der später zu nennende Trapezius der höheren Wirbeltiere (von den Amphibien bis zu den Säugetieren entwickelt). Bei höheren

Wirbeltieren gehen aus diesen Visceralmuskeln der hinteren Kiemenbogen die Muskeln des Schlundes und des Kehlkopfes hervor: Heber und Schnürer des Pharynx und die Erweiterer und Verengerer der Stimmritze.

β) Muskulatur des Rumpfes. Sie besteht aus den direkten Abkömmlingen der Urwirbel bei allen Wirbeltieren. Wir unterscheiden dorsale und ventrale Stammmuskeln, durch die Seitenlinie scharf voneinander getrennt. Die dorsale Muskulatur ist bei allen Fischen auch im ausgebildeten Zustande regelmäßig gegliedert. Sie besteht aus den sich in gleichmäßiger Reihe folgenden Muskelsegmenten, in welchen die Muskelelemente einen geraden, der Längsachse des Rumpfes parallelen Verlauf haben. Die Muskelsegmente (Myomeren) sind durch bindegewebige Scheidewände, Myosepten, voneinander getrennt. Diese erscheinen an der Oberfläche von der Seitenlinie aus aufwärts zuerst leicht schräg nach hinten, dann, in stumpfem Winkel nach vorn umbiegend, weiter aufwärts verlaufend. In der Tiefe aber nehmen sie wiederum schrägen Verlauf, so daß die einzelnen Muskelsegmente, Myocommata, wie Stücke ineinander gesteckter Hohlkegel erscheinen. Auf dem Querschnitt des Rumpfes erscheinen immer mehrere Myomeren als konzentrische Ringe, durch Myosepten getrennt. Die Muskelfasern werden dadurch nicht beeinflußt, sie sind in jedem Segment von gleicher Länge und verlaufen alle wie gesagt parallel der Längsachse des Körpers (vgl. Literatur 1).

Diese Muskelfasern stehen noch nicht in Verbindung mit dem Skelett, nur die allertiefst gelegenen Fasern nehmen an Teilen des Achsenskeletts Ansatz. Am vorderen Ende nehmen die dorsalen Rumpfmuskelmassen Ansatz am Schädel und am obersten Teil des Schultergürtels. Nach hinten setzt sich diese Muskulatur in gleicher Ausbildung in den Schwanz bis zu dessen Ende fort. Zu den unpaaren Rückenflossen schicken bei Ganoiden und Knochenfischen die dorsalen Rumpfmuskeln von ihren oberen Kanten kleine Muskelchen, die eine komplizierte Ausbildung erfahren. Im Schwanz der Fische zeigt die ventrale Muskulatur genau die gleiche Ausbildung wie die dorsale. Die Schwanzflosse erhält ebenso wie die Rückenflosse kleine Muskelchen, die in ihrem dorsalen Teil von der dorsalen, im ventralen Teil von der ventralen Rumpfmuskulatur abstammt. In der Nähe der Seitenlinie findet man meist eine dünne Schicht besonderer Muskelfasern, die durch dunklere Färbung hervortreten. Auch bei Amphibien zeigt die dorsale Rumpfmuskulatur noch das gleichmäßig segmentierte Verhalten. Nach der Mittellinie zu beginnt allerdings schon ein Schwund der Septen und es bereitet sich die Bildung längerer Muskelzüge vor. Bei den ungeschwänzten Amphibien besteht die gleichmäßige Rumpf-Schwanzmuskulatur nur bei den geschwänzten Larven. Nach der Metamorphose beschränkt sie sich auf den Rumpf und läßt eine oberflächliche und eine tiefe Portion unterscheiden; die erstere nimmt am Steißbein Ansatz (vgl. Literatur 1).

Bei Reptilien sind am Schwanz noch ähnliche Verhältnisse wie bei Fischen: die Myocommata sind spitze Hohlkegel (Schwanz der Eidechse); am Rumpf findet man lange Muskelzüge, die man als einen lateralen und medialen Tract unterscheiden kann. Es ist eine Weiterbildung der am Schwanz begonnenen Sonderungen. Diese bestehen in einem mehrfach geknickten schrägen Verlauf der Myosepten, wodurch jederseits 2 Hohlkegel entstehen. Die schrägen Myosepten werden am Rumpf zu Ursprungs- und Endsehnen längerer Züge, die sich an der Wirbelsäule anheften. Die Fasern des äußeren (lateralen) Tracts (Transverso-costalis) verlaufen nach dem Kopf zu lateralwärts, die des medialen verlaufen medialwärts (Transverso-spinalis). Während die oberflächlichen Fasern längere Züge von steilerem Verlauf bilden, sind die tiefen bei schrägerem Verlauf kürzere Bündel. Zwischen dem Kopf und den beiden ersten Halswirbeln beginnt die Sonderung einer kleinen tiefgelegenen Muskelgruppe, der Musculi recti und obliqui postici capitis. Am Schädel nehmen diese und die langen oberflächlichen Faserzüge ihren Ansatz an der Nackenfläche des Hinterhauptbeins. Bei Schildkröten zeigt die Halsportion dieser Muskeln eine sehr mächtige Ausbildung, ebenso am Schwanz, während sie im Rumpfgebiet in verschiedenem Grade rückgebildet sind. Bei den Vögeln ist in der langen, das Becken tragenden Kreuzbeinregion diese Muskulatur reduziert. In der Schwanzregion treten viele ihrer Bündel zu den Schwanzfedern in Beziehung. Bei den Säugetieren ist der mediale und laterale Tract ebenfalls ausgebildet. Der laterale bildet den Sacrospinalis und Splenius, letzterer ist eine Neudifferenzierung bei Säugetieren. Der mediale Tract bildet den Transverso-spinalis und den Spinalis. Man hat diese Portionen wieder eingeteilt nach den Regionen der Wirbelsäule und in verschiedene Schichten. In letzterer Beziehung findet man wieder, daß die oberflächlichen Züge längeren und steileren Verlauf nehmen, die tieferen bei schrägerem Verlauf kürzer sind. Ferner erkennt man, daß bei den meisten Säugetieren die zum Hals und Kopf gelangenden Muskeln eine mächtige Ausbildung zeigen. Die Insertion alle dieser Muskeln am Skelett ist hier durchgeführt und dementsprechend

zeigen die Wirbel mannigfache Muskelfortsätze; jeder Wirbel erhält verschiedene Muskelportionen, wodurch die Beweglichkeit der Wirbelsäule eine sehr mannigfaltige wird. Am Kopf sind die kurzen hinteren geraden und schiefen Muskelchen zwischen Atlas, Epistropheus und Hinterhaupt wohl differenziert (vgl. Literatur 1).

Die gesamte dorsale Stammmuskulatur wird von den hinteren (dorsalen) Aesten der Rückenmarksnerven versorgt, so zwar, daß jedes Myocomma in allen seinen Fasern von dem Nerven seines Segments innerviert wird.

Die ventrale Rumpfmuskulatur wird ebenso von den unteren (ventralen) Aesten der zu dem Segment gehörigen Rückenmarksnerven versorgt. Hier bestehen aber dadurch viel kompliziertere Verhältnisse als dorsal, weil die beiden Gliedmaßenpaare ebenfalls in das ventrale Rumpfgebiet gehören und deshalb ihre Muskulatur mit einer einzigen Ausnahme (Trapezius) von der ventralen Rumpfmuskulatur beziehen. Auch treten sekundär sowohl ventrale Rumpfwie Extremitätenmuskeln durch Wanderung ihres Ursprungs auf die dorsale Rumpfregion über, wodurch sie topographisch den Rückenmuskeln sich anschließen; die Innervation läßt aber ihre ventrale Herkunft erkennen.

Bei allen Wirbeltieren findet die ventrale Muskulatur des Rumpfes seitlich von der ventralen Mittellinie ihren Abschluß durch einen Komplex längsverlaufender Fasern, die das System des Rectus darstellen. Dieser ventralste Teil der Muskulatur schiebt sich nach vorn vor, in den Kopf hinein, zwischen die ventralen Muskeln des Visceralskelettes, an welchem sie Ansatz nehmen, mit jenen visceralen Muskeln in Konkurrenz tretend. Es sind Muskeln von geradem Verlauf, die vom Schultergürtel (Coracoid) zu den Kiemenbogen, von diesen zum Zungenbeinbogen und von diesem endlich zum Kieferbogen neben der Verbindung beider Hälften verlaufen. Bei Selachiern stellen sie eine reich entfaltete Muskulatur dar, bei Ganoiden und Knochenfischen erfahren sie eine teilweise Verkümmerung, werden durch viscerale Muskeln ersetzt. Bei Amphibien lassen sich eine oberflächliche und eine tiefe Portion unterscheiden: Sterno-hyoideus profundus und superficialis, an die sich nach vorn der Genio-hyoideus anschließt. Vom Sterno-hyoideus schließen sich zwei Myocommata dem Herzbeutel an und stellen sehr wahrscheinlich das Material dar, aus welchem sich bei Säugetieren das Zwerchfell ausbildet. Bei Vögeln verbindet sich ein Teil dieser Muskeln mit dem Sphincter colli, die tiefere Portion tritt in Beziehung zu der Luftröhre, die sie niederzieht. Auch geht aus ihnen die Muskulatur des unteren Kehlkopfes (Syrinx) der Vögel hervor. Bei Säugetieren stellen diese Muskeln einen Teil der oberflächlichen Halsmuskulatur dar, die von den zwei ersten Halsnerven (Ansa hypoglossi) versorgt werden; sie schließen sich unmittelbar an die vom Hypoglossus versorgte Zungenmuskulatur an.

Während bei Fischen diese Muskeln aus einer großen Zahl von Myomeren sich zusammensetzen, kann man bei höheren Formen nur eine geringere Zahl durch Zwischensehnen getrennt erkennen; dies kann durch Rückbildung oder durch Verschmelzung von Myomeren zustande kommen.

Das Zwerchfell der Säugetiere gehört zu dieser Muskelgruppe. Indem es vom Herzen, an dessen Hülle es angeschlossen ist, in die Brusthöhle hinabgedrängt wird und die Lungen zur Seite des Herzens eine mächtige Entfaltung erfahren, wird es zu einem Muskelgewölbe, das die Brust- von der Bauchhöhle trennt. Sein Nerv hoch oben vom dritten Halsnerven entspringend, zeigt noch den Weg, den es bei seiner Ausbildung genommen hat. Seine Muskelfasern entspringen von Lendenwirbeln, der Innenfläche der unteren Rippen in Zacken und dem Brustbein und inserieren radiär aufwärts verlaufend in einer mittleren Sehnenplatte, dem Centrum tendineum. Es wird von der Speiseröhre, der Aorta und der unteren Hohlvene, außerdem von Nerven und kleineren Gefäßen, die von der Brust in die Bauchhöhle treten, durchsetzt.

Am Rumpf selbst hat man zwei Muskelgebiete in der ventralen Rumpfwand zu unterscheiden: Die seitliche Muskulatur und die ventral abschließende. Die seitlichen Muskeln der ventralen Rumfwand sind nur bei Petromyzonten unter den Cyclostomen eine einfache Schicht gerade verlaufender Fasern. Bei Bdellostoma ist schon ein schräger Muskel vorhanden Bei allen höheren Wirbeltieren besteht hier die Tendenz verschiedene Schichten von gekreuztem Faserverlauf auszubilden. Die ventral abschließende Muskulatur bildet das System des Rectus, des geraden Bauchmuskels.

Für das Folgende vergleiche Literatur 2, 16, 18 und 19.

Bei Selachiern kann man unter der Seitenlinie zwei Schichten in der seitlichen Rumpfwand unterscheiden, soweit die Rippen sich erstrecken: eine oberflächliche schräg von oben vorn nach hinten unten verlaufender Fasern und eine tiefe gekreuzt dazu, von oben hinten nach vorn unten verlaufend. Ventral von den kurzen Rippen findet sich nur die letztere Schicht, deren Fasern abwärts allmählich in geraden Verlauf übergehen und damit den Rectus bilden, der kein besonderer Muskel ist. Diese einfache Lage nimmt den größten Teil der ventralen Rumpfwand ein bei der Kürze der Rippen.

Man kann also hier von einem einfachen seitlichen Bauchmuskel mit schräg nach vorn absteigendem Faserverlauf sprechen. Dieser erste Muskel ist deshalb von besonderem Interesse, weil er bei allen Wirbeltieren den embryonal zuerst auftretenden seitlichen Bauchmuskel darstellt. Es ist der Musc. obliquus internus, der innere schräge Bauchmuskel. Bei Ganoiden und Knochenfischen tritt außerhalb dieses Muskels der Selachier ein mächtiger Obliquus externus, ein äußerer schräger Bauchmuskel auf, der am Rumpf der mächtigste Muskel ist. Der in der Tiefe intercostal verlaufende Obliquus internus ist nach vorn, dem Schultergürtel zu, an dem er Ansatz nimmt, am mächtigsten entwickelt. Die beiden Muskeln sind übrigens noch nicht wie bei höheren Wirbeltieren ganz scharf getrennt. Ventralwärts vereinigen sie sich immer im einheitlichen Rectus. Bei Dipnoern beginnt eine weitere Sonderung, die bei Amphibien durchgeführt ist und von da an bis zu den höchsten Formen sich erhält.

Fig. 22. Tritonlarve. Querschnitt der Rumpfmuskulatur. oes Musc. obliquus ext. superficalis, oep M. obl. ext. profundus, oi M. obl. internus tr. m. transversus, Rp Rectus prof., Rs Rectus superfic. Nach Maurer.

Bei geschwänzten Amphibien wachsen die ventralen Fortsätze der Urwirbel in die ventrale Rumpfwand herab und es bildet sich aus ihnen die primäre Bauchmuskelgruppe: zuerst der innere (Obliquus internus), dann der äußere (obliquus externus) und zugleich der primäre Rectus, als die ventrale Vereinigung der beiden. Im Larvenstadium werden sie sehr mächtig, dann aber treten gegen Ende dieser Periode die sekundären Bauchmuskeln auf, durch Abspaltung aus den primären hervorgehend: Außerhalb des Obliquus externus bildet sich ein gleicher Muskel mit schrägerem Verlauf, der oberflächliche Obliquus externus und innerhalb des Obliquus internus tritt ein Transversus mit querem Faserverlauf auf. Bei dauernd im Wasser lebenden Formen (Perennibranchiaten) bleiben die sekundären Muskeln schwach, es kommt auch zu verschiedenen Umbildungen: Verminderung der Schichten, Schwund der Intermuskularsepten, so daß einheitliche Muskelschichten entstehen, die aber von segmentalen Nerven versorgt werden. Bei den aufs Land gehenden Formen (Caducibranchiaten) erfahren die primären Muskeln eine verschiedengradige Rückbildung, während

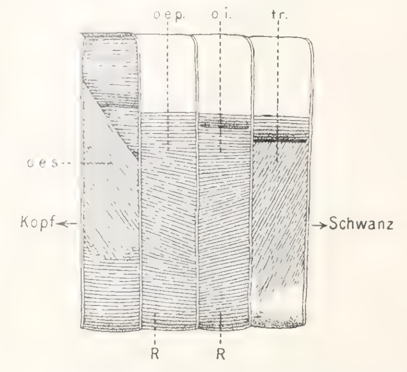


Fig. 23. 4 Rumpfsegmente von Menobranchus in seitlicher Ansicht, um die 4 ventralen Muskelschichten in ihrem Faserverlauf zu zeigen. oep Obliquus externus profundus, oi Obliquus internus und Rp Rectus profundus sind die primären, oes Obl. ext. superficialis, tr Transversus und Rs Rectus superficialis sind die sekundären ventralen Rumpfmuskeln.

die sekundären Muskeln sich stärker ausbilden. Auch hierbei kommt es zu verschiedenen speziellen Bildungen. Der Rectus läßt auch einen sekundären Teil entstehen und sondert sich in einen oberflächlichen und tiefen Teil. An den seitlichen Bauchmuskeln schwinden zuweilen die Mysosepten und zwar beginnt am äußeren schrägen Muskel der Schwund dorsal und schreitet ventralwärts fort, während am Transversus umgekehrt der Schwund ventral beginnt.

Bei Anuren erreicht die sekundäre Muskulatur bleibende Ausbildung, während die primäre ganz schwindet, sodaß zum Beispiel der Frosch nur einen äußeren und einen queren Bauchmuskel, sowie einen Rectus hat.

Bei Reptilien tritt abgesehen von den Schildkröten, wo die Muskeln rückgebildet sind, eine noch reichlichere Schichtenbildung auf, da zwischen den vier bei Urodelen schon bestehenden Muskeln noch die Rippen erscheinen mit inneren und äußeren Intercostalmuskeln. Bei Sphenodon kann man sogar acht Schichten unterscheiden. Sie erleiden aber bei Lacertiliern, Krokodilen und Schlangen in verschiedenem Maße Umbildungen, so daß die Schichtenzahl meist geringer wird. Chamäleo zeigt die einfachsten Verhältnisse.

Der Rectus läßt keine oberflächliche und

tiefe, sondern eine laterale und eine mediale Portion unterscheiden und tritt in verschiedener Weise mit dem Integument in Verbindung (vgl. Literatur 18).

Bei den Vögeln sind die ventralen Rumpfmuskeln in drei Schichten ausgebildet, aber

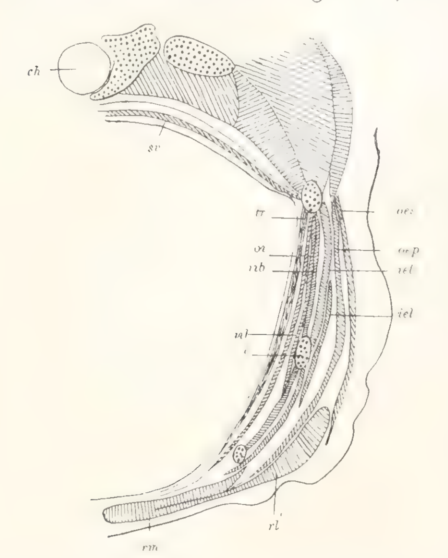


Fig. 24. Lacerta, Querschnitt der Rumpfmuskulatur. oes Musc. obl. ext. superf., oep Musc. obl. ext. profundus, iel Musc. intercostalis ext. longus, ieb Musc. intercostalis ext. brevis, iil Musc. intercostalis internus longus, iib Musc. intercostalis internus brevis, oi Musc. obl. internus, tr Musc. transversus, rl Musc. rectus medialis, sv Musc. subvertebralis, ch Chorda dorsalis, c Rippe. Nach Maurer.

durch die mächtige Entfaltung des Brustbeins auf die seitliche Thoraxwand und die hintere Bauch-(Abdominal)-gegend beschränkt. Obliquus externus, internus und Transversus werden unterschieden. Den ventralen Abschluß bildet ein schwacher Rectus. Auch Intercostalmuskeln sind ausgebildet (vgl. Literatur 1 u. 12).

Bei Säugetieren sind diese Muskeln im Hals-, Brust- und Bauchteil verschieden ausgebildet: Am Hals nehmen sie eine tiefe Lage vor und zur Seite der Wirbelsäule (Scaleni und Longus colli) ein. An der Brust bilden sie die Intercostalmuskeln als äußere und innere in gekreuztem Verlauf unterschieden. Auch die Muskeln der Bauchregion erstrecken sich mit ihren Ansätzen auf die Brust, breiten sich dann aber seitlich als kräftige Platten aus, an welchen Zwischensehnen in verschiedener Ausbildung noch die Segmentierung vielfach erkennen lassen. Man unterscheidet einen schräg absteigenden Obliquus externus, einen schräg aufsteigenden Obliquus internus und einen innersten queren Transversus. Diese drei Muskeln setzen sich ventralwärts in Aponeurosen fort, die eine Scheide um den folgenden Muskel (die Rectusscheide) bilden. Die beiderseitigen Rectusscheiden vereinigen sich in der Mittellinie zu einem Sehnenstreifen, der Linea alba. Diese erstreckt sich vom Brustbein bis zur Schambeinfuge. Ventral,

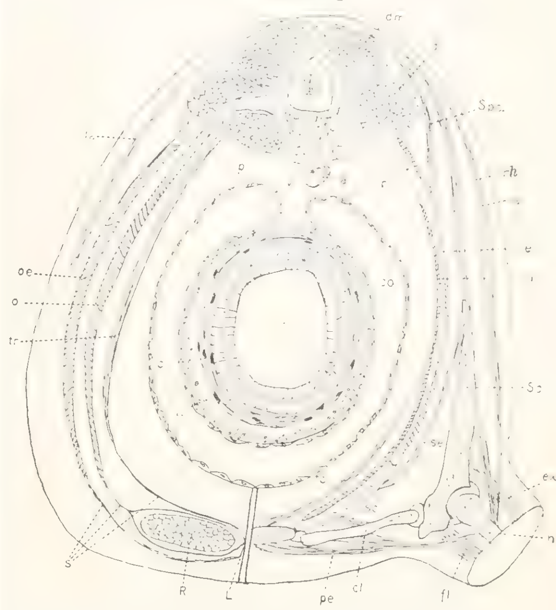


Fig. 25. Querschnitt durch den Rumpf eines Säugetiers (Schema) zur Demonstration der Muskulatur. Rechte Hälfte der Figur Brust, linke Hälfte Bauchregion, dm und dl lateraler und medialer Trakt der langen Rückenmuskeln. rh Rhomboides, la Latissimus dorsi, Trapezius zwischen beiden liegend ist weggelassen, Extremitätenrückenmuskeln. Spc Serratus posticus, spinocostaler Muskel, ie und ii Intercostalis externus und internus, ri Rippe, tc Transversus thoracis. Ventrale Brustmuskeln. sc Schulterblatt, cl Schlüsselbein, pe Musc. Pectoralis major, sc Musc. subclavius, se Musc. serratus anticus major, Extremitäten-Brustmuskeln. h Humerus, ex Streck-, fl Beugemuskeln des Oberarms. oe Musc. obliquus externus, oi Musc. obliquus internus, tr Musc. transversus abdominis, R Musc. rectus, s Aponeurosen der seitlichen Bauchmuskeln, die Rectusscheide bildend, L Linea alba, p Musc. psoas, v Wirbelkörper, a Aorta, co Leibeshöhle, i Darmrohr, c glatte Ring- und l glatte Längsmuskelschicht der Darmwand.

zu beiden Seiten der Mittellinie liegt der einfache Rectus, der an der Außenfläche des Brustbeins und oberer oder mittlerer Rippen entspringt und sich bis zur Schambeinfuge nach hinten erstreckt. Dorsal, zur Seite der Lendenwirbel ist noch ein Quadratus lumborum zu unterscheiden, der schon bei Reptilien vorgebildet ist. Ferner besteht bei Beuteltieren ein Beutelmuskel, der rudimentär auch bei

höheren Säugetieren erhalten ist; auch beim Menschen ist er als kleiner Pyramidalis vor dem Rectus, gerade über der Schambeinfuge vorhanden. Er inseriert am unteren Drittel der Linea alba. Er kann auf einer oder auf beiden Seiten fehlen. Der Obliquus internus bildet beim männlichen Geschlecht mit einigen Faserbündeln einen Aufhängemuskel des Hodens, den Cremaster. Die Aponeurose des Obliquus externus schließt gegen den Oberschenkel zu mit dem Leistenband (Ligamentum Pouparti) ab. Es erstreckt sich vom vorderen Darmbeinhöcker zur Schambeinfuge. An das Leistenband schließt sich direkt die Fascie des Oberschenkels, die Fascia lata an. Die Wirkung der drei seitlichen und des geraden Bauchmuskels stellt sich als Druck auf die Eingeweide der Bauchhöhle dar. Man bezeichnet sie als die Bauchpresse, das Prelum abdominale.

Ueber dem Leistenband, wenige Zentimeter seitlich von der Schambeinfuge, zeigt die Aponeurose des Obliquus externus eine schlitzförmige Durchbrechung, d. i. der äußere Leistenring, die Mündung des Leistenkanals. Letzterer durchsetzt die vordere Bauchwand in schräger Richtung und dient beim Manne dem Durchtritt des Samenstrangs, beim Weibe wird er vom runden Mutterband durchsetzt. Der Kanal beginnt lateral an der inneren Fläche der Bauchwand mit dem inneren Leistenring und zieht schräg medialwärts zum äußeren Leistenring. Beim männlichen Geschlecht tritt vor der Geburt der Hoden durch den Leistenkanal in den Hodensack herab und drängt Fasern des Obliquus internus mit heraus, die ihn schleifenartig als Aufhängemuskel umgeben. Der Leistenkanal gibt als dünnere Stelle der Bauchwand Veranlassung zur Bildung von Brüchen, dadurch, daß bei Wirkung der Bauchpresse Organe der Bauchhöhle (Darmschlingen) herausgepreßt werden.

Besondere Erwähnung verdienen noch zwei Muskeln, die außer den Monotremen allen Säugetieren zukommen: es sind die Musculi serrati postici (superior und inferior). Sie stellen durch dorsales Emporwandern einiger Faserbündel der beiden Intercostalmuskeln entstandene aus einer verschieden großen Zahl von Zacken bestehende Muskeln dar, die topographisch den Rückenmuskeln zugehören. Sie werden von den Intercostalnerven, also ventralen Aesten versorgt. Wenn beide im gleichen Segment bestehen, bedeckt der Inferior den Superior. Sie sind Erweiterer des Thorax. Sie entspringen an Dornfortsätzen und der Dorsalaponeurose und inserieren in Zacken an den Rippen: der obere hat schräg absteigenden, der untere schräg aufsteigenden Verlauf.

γ) Die Schwanzmuskulatur. Sie wiederholt bei allen Wirbeltieren die Verhältnisse der dorsalen Rumpfmuskulatur, die ventral auch den Befund der dorsalen Hälfte zeigen. Von Amphibien an treten aber von den ventralen Schwanzmuskeln an der Schwanzwurzel Portionen zum Becken und der hinteren Gliedmaße in Beziehung. Von diesen verdient besonders ein Sitzbein-Schwanzmuskel Erwähnung, weil er die Grundlage eines Schnürmuskels der Kloake darstellt. Bei Säugetieren erfährt dieser Muskel mit der Verstreichung der Kloake und der Ausbildung der äußeren Geschlechtsorgane eine komplizierte Sonderung. Aus ihm gehen die Muskeln des Afters und der Geschlechtsteile hervor: man pflegt sie als Dammmuskulatur zu bezeichnen (Literatur 8). Außerdem gehören hierher die Heber, Senker und Seitwärtsbeweger des Schwanzes der Säugetiere, Muskeln, die beim Menschen mit diesem ganzen Skeletteil verkümmert sind. Man unterscheidet Flexores, Extensores und Abductores caudae.

δ) Muskulatur der Extremitäten. Sie bildet sich bei allen Wirbeltieren von der ventralen Rumpfmuskulatur aus. Eine Anzahl von Myomeren lassen von ihren ventralen Fortsätzen Knospen in die Anlagen der Extremitäten einwachsen (vgl. Literatur 2 u. 21). Die Knospen der vorderen Extremität entstammen Myomeren der unteren Hals- und oberen Brustregion, die für die hintere Extremität entstammen Urwirbeln der Lenden- und Kreuzbeinregion. Bei Fischen (Selachiern) entstammen sie vorderen und hinteren Rumpfsegmenten. Diese Knospen gruppieren sich in jeder Extremität als obere und untere; die oberen lassen die Streck-, die unteren die Beugemuskeln der Extremitäten hervorgehen.

In den Extremitätenanlagen lösen sich die Knospen auf und das Zellenmaterial erfährt eine Neudifferenzierung. Aus der Innervation läßt sich für jeden Muskel erkennen, aus welchem Myomer er stammt. Jede Extremität läßt einen Gürtel und eine freie Gliedmaße unterscheiden: obere Extremität Schultergürtel, untere Beckengürtel. Der Gürtel vermittelt den Anschluß der Extremität an den Rumpf und seine Muskulatur breitet sich am Rumpf aus in verschiedener Weise. Wir unterscheiden also Muskeln des Gürtels und Muskeln der freien Extremität.

Muskeln des Schultergürtels (vgl. Literatur 1). Wir unterscheiden solche, die vom Rumpf zum Gürtel und solche, die vom Gürtel zur Extremität verlaufen. Von den Amphibien an treten manche von diesen Muskeln vom Rumpf direkt zum Oberarm. Eine besondere Stellung nimmt der Trapezius ein, bei Selachiern entwickelt und dann erst wieder bei Amphibien erscheinend. Dieser sowie der Interscapularis der Anuren entstammt Kiemenmuskeln. Der Trape-

zius greift bei Reptilien zum ersten Male auf die Wirbelsäule über, bei Säugetieren hat er sich bis zu unteren Brustwirbeln ausgebreitet. Er läßt noch als vordere am Hals gelegene Portion den Sternocleidomastoideus entstehen. Alle übrigen Schultermuskeln gehen von der ventralen Rumpfmuskulatur aus. Bei Selachiern sehr einfach, lassen sie noch metameren Aufbau erkennen. Bei Ganoiden und Knochenfischen fehlt eine besondere Schultermuskulatur, der Seitenrumpfmuskel selbst verbindet sich mit der Clavicula. Bei Amphibien tritt eine komplizierte Muskulatur auf, die verschiedene Schichten unterscheiden läßt. Sie nehmen teils eine obere, teils eine untere Lage ein und werden von oberen und unteren Thoracalnerven aus dem Armgeflecht versorgt. So unterscheidet man hier schon Extremitäten-Rücken- und -Brustmuskeln. Bei Reptilien erfahren diese Muskeln eine kompliziertere Ausbildung, ebenso bei Vögeln, wo besonders der Brustmuskel (Pectoralis) als Flugmuskel eine mächtige Ausbildung zeigt. Bei Säugetieren sind die Extremitäten-Brust- und -Rückenmuskeln große Platten geworden, die sich weit über den Rumpf erstrecken und die eigentliche Rumpfmuskulatur teils überlagern, teils verdrängen. Von Rückenmuskeln sei hier nochmals der Trapezius, ferner der Latissimus dorsi und Rhomboides genannt. Von Brustmuskeln der Pectoralis major und minor, der Serratus anticus und der Subclavius. Dazu kommen die von dem Schultergürtel entspringenden Muskeln, der Deltoides und die vorderen und hinteren Schulterblattmuskeln.

Bei Vögeln und Säugetieren erhalten in ganz verschiedener Weise Muskeln der Brust, des Rückens und der Schulter Beziehungen zur Haut. Bei den Vögeln sind es unter anderen Trapezius, Latissimus, Pectoralis, Deltoides, Serratus, welche Fasern zur Haut der Flügel treten lassen und die Flughaut-(Patagial-)muskeln bilden. Bei Säugetieren breiten sich besondere Portionen des Pectoralis major und Latissimus dorsi an der ganzen Brust-, Bauch- und Rückenhaut aus und bilden einen Panniculus carnosus zur Bewegung der Haut. Bei Affen und dem Menschen hat er eine Rückbildung erfahren, bei Monotremen bildet er einen Schließmuskel der Mammartasche, hat also Beziehung zur Brutpflege erhalten (vgl. Literatur 1 u. 12).

Muskeln der freien oberen Extremität. Die Muskeln der Brustflosse der Fische, aus oberen und unteren Muskelknospen hervorgehend, sondern sich in obere und untere Züge, welche, zu den Flossenradien ziehend, eine Gliederung und Schichtenbildung zeigen. Oberflächliche Fasern verlaufen weiter gegen das Ende der Flosse, tiefere Fasern inserieren früher. Die Züge sind nach Radien geordnet. Bei Knochenfischen entspringen diese Muskeln vom mächtigen Schlüsselbein, und inserieren an dem Hautskelett, unter dessen Entfaltung das innere Skelett eine Rückbildung erfahren hat. Von den Amphibien an unterscheidet man Muskeln des Oberarms, Vorderarms und der Hand. Sie gliedern sich in Beuge- und Streckmuskeln. Diese werden vom Nervus radialis, jene vom Nervus medianus und ulnaris versorgt.

Oberarm. Die Streckmuskeln entspringen mit mehreren Köpfen, die gemeinsam am Vorderarm inserieren. Dies findet sich bei allen höheren Wirbeltieren, Verschiedenheiten bestehen in der Zahl der Köpfe und in dem speziellen Verhalten ihres Ursprungs vom Schultergürtel. Die Beugemuskeln lassen drei Züge unterscheiden: solche, die vom Schulterblatt zum Oberarm (Coraco-brachialis), andere, die vom Schulterblatt zum Vorderarm (Biceps) und endlich solche, die vom Oberarm zum Vorderarm verlaufen (Brachialis internus). Sie sind verschieden kombiniert: Bei Reptilien (Eidechsen) tritt schon ein Biceps auf. Bei Vögeln verbreitet sich ein Teil des Biceps in der Flughaut (im Propatagium). Bei den Säugetieren zeigt sich der Biceps verschieden.

Vorderarm. Man unterscheidet Streckmuskeln (Extensoren) in radialer und Beugemuskeln (Flexoren) in ulnarer Anordnung. An beiden Gruppen bilden sich oberflächliche und tiefe Schichten aus. Die oberflächlichen sind an ihrem Ursprung miteinander in Zusammenhang. Ein allgemeiner einheitlicher Plan ist bei aller Verschiedenheit der speziellen Sonderung in den einzelnen Klassen nicht zu verkennen. Die Ursprünge gehen zum Teil vom Oberarm, zum Teil vom Vorderarm aus. Jene inserieren am Vorderarm oder der Hand, diese an der Hand und zwar an der Handwurzel, an der Mittelhand oder an den Fingern. Auch vom Radius zur Ulna verlaufende Muskeln bestehen. Bei den Vögeln bestehen nur zwei oberflächliche und zwei tiefe Muskeln. Sie sind sehr kräftig und inserieren an der Handwurzel. Die Beuger lassen bei Primaten oberflächliche und tiefe Schicht, jede wieder in zwei Lagen gesondert unterscheiden, während an den Streckmuskeln die oberflächliche Schicht in eine radiale und ulnare, die tiefe in eine proximale und distale Gruppe zerfällt.

Hand. Die meisten Vorderarmmuskeln treten zur Hand. Daneben ist an der Hand selbst auch eine komplizierte Muskulatur entfaltet: Bei Amphibien sind Streckmuskeln an den einzelnen Fingern, bei Anuren feiner gesondert, als bei Urodelen. Auch bei Reptilien sind solche von der Ulnarseite der Mittelhand an den Fingern verlaufende

Muskelchen vorhanden. Bei Säugetieren sind diese Muskeln durch solche des Vorderarms ersetzt. An der Beugefläche sind bei Amphibien noch kompliziertere Muskeln ausgebildet. Bei Anuren bestehen zwei Schichten von Fingerbeugern. Bei Reptilien ähneln sie den Muskeln der Streckseite. Bei Säugetieren besteht eine reich gesonderte Muskulatur des Daumen- und Kleinfingerballens, außerdem sind in der Hohlhand oberflächliche Muskeln als Lumbricales, tiefe als Interossei ausgebildet.

Untere Extremität. Bei Fischen entsprechen die Befunde der Muskeln denen der Vorderflosse, nur sind sie der geringeren Ausbildung der Hinterflosse entsprechend reduziert. Bei den höheren Formen fehlt infolge der festen Verbindung des Beckengürtels mit der Wirbelsäule eine vom Rumpf zum Beckengürtel tretende Muskelgruppe. Die Hüftmuskeln verlaufen vom Becken zum Oberschenkel, können sich auch weiter abwärts erstrecken. Man unterscheidet äußere und innere. Die äußeren sind die Glutaei, schon bei Amphibien ausgebildet. Innere sind der Iliacus und Psoas, letzterer wohl von subvertebralen Rumpfmuskeln ableitbar. Am Oberschenkel unterscheidet man Strecker (Extensoren), Beuger (Flexoren) und Adductoren. Erstere werden vom Nervus femoralis, die Beuger vom Ischiadicus und die Adductoren vom Obturatorius innerviert. Die Strecker liegen an der Vorderfläche des Oberschenkels und inserieren an der Tibia. Man hat oberflächliche und tiefe unterschieden (den Rectus und die Vasti: Extensor cruris quadriceps). Die hinten liegenden Beuger hat man in einen äußeren (lateralen, Biceps) und inneren (medialen, Semitendinosus und Semimembranosus) Zug unterschieden. Die Adductoren liegen als starke Muskelmasse der Innenfläche des Femur an und sind, in verschiedener Weise in einzelne Portionen gesondert, bei Urodelen, Reptilien, Vögeln und Säugetieren ausgebildet (Adductor longus, brevis, magnus, Gracilis).

An Unterschenkel und Fuß sind Beuger und Strecker unterscheidbar. Jene werden vom Nervus tibialis, diese vom Nervus peroneus versorgt, den Endästen des Ischiadicus. Die Strecker, an der Vorderfläche des Unterschenkels angeordnet, lassen bei Amphibien eine oberflächliche und tiefe Schicht unterscheiden, ihre Endsehnen verlaufen teils zur Fußwurzel, teils zu den Zehen. Der tiefe, kurze Zehenstrecker entspringt beim Menschen am Fußrücken. Auch an den Beugern sind oberflächliche und tiefe Muskeln zu unterscheiden. Schon bei Amphibien bestehen Musculi plantares. Sie sind auch bei Reptilien entwickelt und zwei von ihnen vereinigen sich bei Säugetieren in der Achillessehne, die am Fersenhöcker Ansatz nimmt. Bei den meisten Beuteltieren inserieren die Muskeln noch getrennt. Sie stellen den Gastrocnemius und Soleus der höheren Säuger dar (Wadenmuskeln). Die tiefen Beugemuskeln treten wieder teils zur Fußwurzel, teils zu den Zehen. Letztere bilden einen langen gemeinsamen Zehenbeuger.

An der Fußsohle sind unterscheidbar Muskeln des Großzehen- und solche des Kleinzehenballens, ferner Muskeln der Fußmitte. Letztere lassen einen oberflächlichen Zehenbeuger, ferner die Lumbricales und in der Tiefe die sieben Interossei unterscheiden.

i) Glatte Muskulatur der Wirbeltiere. Glatte Muskelzellen finden sich bei Wirbeltieren in der Wand des Darmkanals, wo sie allgemein eine äußere Längs- und eine innere Ringmuskelschicht bilden, in welchen die Muskelzellen zu Bündeln von parallelem Verlauf angeordnet sind. Am Vorderdarm bestehen zum Teil in gleicher Anordnung noch quergestreifte Muskelfasern, besonders in der Wandung des Schlundes und der Anfangsstrecke der Speiseröhre, dazwischen treten aber dann die glatten Muskelzellen auf, welche im weiteren Verlauf des Darms bis zum After allein bestehen. Bei Fischen findet man in der Speiseröhre eine mächtige Ringmuskulatur aus quergestreiften Elementen. Bei einigen Knochenfischen (Cobitis) findet man auch quergestreifte Muskelzellen in der Darmwand. Am Enddarm sind die äußeren Längsmuskeln bei Säugetieren zu drei Längsstreifen, Tänien auseinandergewichen. Am Magen sind die Schichten der Form des Organs entsprechend modifiziert; in der Luftröhre und den Bronchien zeigt die Wandung ringförmig verlaufende Muskelzellbündel. Ferner kommen glatte Muskelzellen der Wandung der Blut- und Lymphgefäße zu. In der Wand der Arterien bilden sie in der mittleren Wandungsschicht eine Ringschicht, während in der Venenwand hauptsächlich Längszüge in der äußeren Schicht sich finden. Die Lymphgefäße gleichen im allgemeinen den Venen, zeigen aber schwächere Wandungen. Ferner kommen glatte Muskelzellen in verschiedener Schichtung und Anordnung der Wandung der Ausführwege vieler Drüsen zu. Besonders hervorzuheben sind die Ausführgänge der Harn- und Geschlechtsorgane. Die Wand der Harnblase zeigt ein Geflechte von Bündeln glatter Muskelzellen. Beim männlichen Geschlecht besitzen die Samenleiter Längs- und Ringschichten, beim weiblichen Geschlecht zeigt besonders der Uterus eine mächtige Muskulatur, die je nach der Form des Organs verschieden ist, aber auch hier ist sie von Längs- und Ringfasern ableitbar. Endlich kommen in der Lederhaut

Muskelzellbündel vor. Bei Amphibien und Säugetieren stehen sie zum Teil mit Drüsen in Beziehung, bei Vögeln und Säugetieren treten sie auch zu den Feder- und Haarbälgen (Arrectores pilorum).

k) Herzmuskulatur (Myocardium). In der Herzwand sämtlicher Wirbeltiere ist die Muskulatur des Vorhofs von der Kammermuskulatur getrennt durch einen an der Grenze beider Herzabschnitte gelegenen bindegewebigen Ring (Annulus fibrosus). Die Herzmuskelzellen bilden durch kettenartige Aneinanderschließung Fasern und durch die treppenartigen Seitenfortsätze der Zellen entstehen Netze von Muskelzellen, an welchen die Zellgrenzen leicht nachweisbar sind. Der Längsverlauf der Zellketten läßt eine Faserung erscheinen. Schichten von scharf getrenntem Faserverlauf, wie sie in der Darmwand von den glatten Muskelzellen gebildet werden, sind hier nicht unterscheidbar. Immerhin läßt sich eine gewisse Regelmäßigkeit in der Anordnung der Fasern nicht verkennen: so findet man oberflächlich meist eine vorwiegend längsverlaufende Muskulatur oder die oberflächlichen Fasern bilden Längsspiralen, während sie in der Tiefe mehr schräg und zu innerst ringförmig angeordnet sind. Die Herzmuskulatur ist nicht immer eine kompakte, sondern an eine äußere kompakte Schicht schließt sich bei niederen Wirbeltieren dauernd, bei Säugetieren am embryonalen Herzen ein spongiöses Trabekelwerk von Muskelbündeln an. Aus solchem (Trabeculae carneae) bilden sich bei Säugetieren auch die für den Abschluß der Vorhof-Kammerklappen wichtigen Papillarmuskeln. Die Stärke der Muskelwand ist nicht in allen Abschnitten des Herzens gleich, sie richtet sich nach der Leistung, so daß im allgemeinen die Muskulatur des Vorhofs schwächer als die des Ventrikels ist. Auch die Wandung der beiden Kammern ist ungleich: beim Embryo des Menschen z. B. ist die Wandung der rechten Kammer stärker als die der linken, später wird es umgekehrt. Das hängt zusammen mit den Verhältnissen des Arteriensystems: beim Embryo besteht eine Verbindung der Lungenarterie mit der Aorta, wodurch der rechte Ventrikel teilnimmt an der Arbeit des linken: das Blut wird hier nicht nur in den Körper, sondern auch in die Placenta getrieben. Das fällt vom Momente der Geburt an fort und jene Arterienverbindung, der Ductus arteriosus Botalli wird rückgebildet. An der Scheidewand des Herzens ist bei Säugetieren und dem Menschen ein Muskelzug erkannt worden, welcher vom Kammer- zum Vorhofabschnitt zieht, so daß also doch ein, wenn auch lokaler Zusammenhang beider Muskelabschnitte besteht. Man hat ihn als bedeutsam für die Regulierung der Herzbewegung angesprochen. Ueber den Bau der Muskelelemente vgl. Seite 14. Weiteres vgl. in dem Art. „Herz“.

Literatur: *Lehr- und Handbücher: 1.* ***C. Gegenbaur,*** *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere, Leipzig 1898, Band I, S. 595 bis 700. — 2.* ***O. Hertwig,*** *Handbuch der Entwicklungslehre der Wirbeltiere, Jena 1906, Bd. III, 1. Teil. Maurer, Entwicklung des Muskelsystems, S. 1 bis 80 (Literatur). — 3.* ***Korschelt*** *und* ***Heider,*** *Lehrbuch der vergl. Entwicklungsgeschichte der wirbellosen Tiere, spezieller Teil, erstes Heft, Jena 1890. — 4.* ***K. C. Schneider,*** *Lehrbuch der vergleichenden Histologie der Tiere, Jena 1902. — 5.* ***M. Heidenhain,*** *Plasma und Zelle, Jena 1911, Bd. I, Lieferung 2, S. 507 bis 686 (Literatur). — 6.* ***Vialleton,*** *Elements de Morphologie des Vertebrès, Paris 1911, S. 257 bis 258. — 7.* ***R. Wiedersheim,*** *Vergleichende Anatomie der Wirbeltiere, 7. Aufl., Jena 1909. — 8.* ***Spalteholz,*** *Handatlas der Anatomie des Menschen, 5. Aufl., Leipzig 1907, Bd. II. — 9.* ***Kölliker,*** *Handbuch der Gewebelehre des Menschen, Bd. I, Leipzig 1889, S. 394. — 10.* ***Hatschek,*** *Lehrbuch der Zoologie, Jena 1888. — Monographien und Abhandlungen: 11.* ***O.*** *und* ***R. Hertwig,*** *Das Nervensystem und die Sinnesorgane der Medusen, Leipzig 1878, S. 161fg. — 12.* ***M. Fürbringer,*** *Untersuchungen zur Morphologie und Systematik der Vögel, Amsterdam 1888, 1. Teil, S. 281 bis 785, 2. Teil, S. 894 bis 991 u. S. 1053 bis 1066 (Literatur). — 13.* ***Derselbe,*** *Ueber die spino-occipitalen Nerven der Selachier und Holocephalen. Festschrift für Gegenbaur, Leipzig 1897, Bd. III, S. 406 bis 447, 458 bis 462, 468 bis 470, 493 bis 496, 509 bis 511, 537 bis 541, 565 bis 580, 600 bis 609, 627 bis 631, 648 bis 651, 700, 706, 730fg. — 14.* ***G. Ruge,*** *Untersuchungen über die Gesichtsmuskulatur der Primaten, Leipzig 1887. — 15.* ***Derselbe,*** *Ueber das periphere Gebiet des Nervus facialis bei Wirbeltieren. Festschrift für Gegenbaur, Leipzig 1897, Bd. III, S. 195 bis 348. — 16.* ***F. Maurer,*** *Aufbau und Entwicklung der ventralen Rumpfmuskulatur der Urodelen, Amphibien usw. Morphol. Jahrb., Bd. XVIII, S. 76 bis 179, 1891 (Literatur). — 17.* ***Derselbe,*** *Elemente der Rumpfmuskulatur bei Cyklostomen und höheren Wirbeltieren usw. Morphol. Jahrb., Bd. 21, 1894, S. 473 bis 619. — 18.* ***Derselbe,*** *Die ventrale Rumpfmuskulatur einiger Reptilien. Festschrift für Gegenbaur, Leipzig 1896, S. 181 bis 257. — 19.* ***Derselbe,*** *Untersuchungen zur vergleichenden Muskellehre der Wirbeltiere. Die Musculi serrati postici der Säugetiere und ihre Phylogenese, Jena 1905. — 20.* ***Felix,*** *Ueber Wachstum der quergestreiften Muskulatur nach Beobachtungen am Menschen. Zeitschr. f. wissenschaftl. Zoologie, Bd. 48. — 21.* ***H. Braus,*** *Ueber die Innervation der paarigen Extremitäten bei Selachiern, Holocephalen und Dipnoern, Jenaische Zeitschr., Bd. 31, N. F. 24, 1898. — 22.* ***Rollet,*** *Ueber den Bau der quergestreiften Muskelfasern. Denkschriften der Kais. Akademie der Wissensch., mathem.-naturw. Klasse, Wien, Bd. 49 und 51. — 23.* ***Derselbe,*** *Ueber die Streifen N (Nebenscheiben), das Sarkoplasma und die Kontraktion der quergestreiften Muskelfasern. Arch. f. mikrosk. Anatomie, Bd. 37. — 24.* ***Derselbe,*** *Untersuchungen über Kontraktion und Doppelbrechung der quergestreiften Muskelfasern. Denkschriften*

der Kaiserl. Akademie der Wissensch., mathem.-naturw. Kl., Wien, Bd. 58. — 25. **Bremer,** *Ueber Muskelspindeln nebst Bemerkungen über Struktur, Neubildung und Innervation der quergestreiften Muskelfasern. Archiv f. mikrosk. Anatomie, Bd. 22.* — 26. **Godlewski,** *Die Entwicklung des Skelett- und Herzmuskelgewebes der Säugetiere. Archiv f. mikrosk. Anatomie, Bd. 40.* — 27. **C. Rabl,** *Theorie des Mesoderms, I. und II. Teil Morphol. Jahrb., Bd. XV und XIX.*

F. Maurer.

Muskeln.

Allgemeine Physiologie der Muskeln.

1. Bau und Funktion der Muskeln: a) Anatomie und Histologie der Muskeln. b) Chemischer Aufbau der Muskeln. c) Die physikalischen Eigenschaften der Muskeln. 2. Die Lebensbedingungen der Muskeln: a) Der Sauerstoff. Die Totenstarre der Muskeln. b) Der Wassergehalt. Die Wasserstarre. c) Die Salze. d) Die Säuren. e) Die Temperatur. f) Die vom Zentralnervensystem kommenden Erregungen. Arbeitshypertrophie, Inaktivitätsatrophie, Entartung. 3. Die Wirkung von Reizen auf den Muskel: a) Definition des Reizbegriffes, Erregung und Lähmung, Erregbarkeit, Erregungsleitung. b) Adäquate und inadäquate Reizung. c) Die Angriffsstelle der Reize. Nervenendorgan. Die rezeptive Substanz. Die Wirkung von Curare, Nikotin, Atropin, Adrenalin auf die rezeptive Substanz. d) Die Reizqualitäten: α) Der elektrische Reiz. β) Der mechanische Reiz. e) Die Reizdauer. f) Die Reizintensität. g) Die Reizfrequenz. 4. Energie und Stoffwechsel des Muskels: a) Energetik der Muskeln. b) Produktion mechanischer Energie: α) Die Muskelarbeit. β) Die Muskelzuckung. γ) Die Veränderung der Muskelzuckung durch Erregung und Lähmung des Muskels. c) Produktion elektrischer Energie: α) Der Ruhestrom. Die Präexistenztheorie und Alterationstheorie. Der Aktionsstrom. β) Die Beziehung zwischen Zuckung und Elektrizitätsproduktion. γ) Rhythmische Aktionsströme. δ) Die Theorie der Reizwirkung des elektrischen Stromes und die Theorie der galvanischen Erscheinungen am Muskel. d) Die Produktion thermischer Energie. e) Verbrauch chemischer Energie. Gas- und Stoffwechsel des Muskels. Die Quelle der Muskelkraft. 5. Die Theorie der Kontraktion.

1. Bau und Funktion der Muskeln. a) A n a t o m i e u n d H i s t o l o g i e d e r M u s k e l n. Die Muskeln dienen in erster Linie den Bewegungsvorgängen. Am Menschen lassen sich zwei Arten von Muskeln unterscheiden, die q u e r g e s t r e i f t e n und die g l a t t e n Muskeln. Jene sind durch eine Querstreifung charakterisiert, sie bilden die große Masse der Skelettmuskeln und werden vom Zentralnervensystem aus willkürlich zur Verkürzung gebracht. Die Muskelfasern, welche jeden quergestreiften Muskel zusammensetzen, sind vielkernige Zellen von 0,1 bis 0,01 mm Breite und einer Länge, die zwischen 50—100 mm schwankt (Fig. 1). Jede Faser ist von einer farblosen Membran, dem S a r c o l e m m umgeben. Der Inhalt der Faser besteht aus F i b r i l l e n - b ü n d e l n, welche in einer feinkörnigen Zwischensubstanz, dem S a r c o p l a s m a eingelagert sind. Die Querstreifung entsteht dadurch, daß jede Fibrille aus einer Kette von Elementen zusammengesetzt ist, welche verschieden stark lichtbrechende Schichten aufweisen.

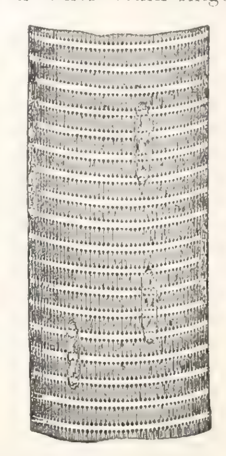


Fig. 1. Muskelfaser vom Säuger, frisch, bei h o h e r Einstellung. Nach S c h ä f e r. Sarkoplasmatische Interstitien dunkel. Aus H e i d e n h a i n, Plasma und Zelle.

Die glatten Muskeln, welche vom sympathischen Nervensystem aus innerviert werden, sind dem Willen nicht unterworfen. Die einzelnen Fasern sind einkernige, spindelförmige Zellen, 0,04 bis 0,1 mm breit und 0,05 bis 0,25 mm lang (Fig. 2).

Eine Mittelstellung zwischen den quergestreiften und glatten Muskeln scheinen die schräggestreiften Muskeln einzunehmen, wie sie bei den Weichtieren und Würmern vorkommen. Die quer gestreiften Muskelfasern sind zu kompakten Muskeln und Muskelgruppen vereint, welche sich mit ihren Sehnen an gelenkig verbundene Knochen ansetzen und durch ihre Verkürzung die Bewegung der Skeletteile veranlassen. Die glatten Muskeln treten in den Wandungen röhrenförmiger Organe wie z. B. im Darm auf. Sie sind in der Regel in zwei Schichten angeordnet in einer ringförmigen Schicht und in einer



Fig. 2. Zwei glatte Muskelfasern aus dem Dünndarm eines Frosches. 240mal vergr. Durch 35%ige Kalilauge isoliert. Die Kerne haben durch die Kalilauge ihre charakteristische Form eingebüßt. Aus H e i d e n h a i n, Plasma und Zelle.

Längsschicht. Sie vermitteln meist in Abhängigkeit von einem im Organ selbst gelegenen Nervensystem einen eigentümlichen Bewegungsmodus, den wir als Peristaltik bezeichnen. Wenn wir den bloßgelegten Darm eine Kaninchens betrachten, dann gewinnen wir den Eindruck eines Haufens von Würmern, welche sich wirr durcheinander bewegen. Die Bewegung der Würmer ist gleichfalls eine peristaltische. Wir sehen an einer Stelle des Darmes eine Einschnürung auftreten, die nach dem Ausführungsgang des Darmrohres hinwandert und den Darminhalt vor sich hertreibt. Diese Einschnürung entsteht durch Verkürzung der Ringmuskeln. Die Tätigkeit derselben wird durch die Längsmuskeln unterstützt, die das Eingeweiderohr über den Darminhalt förmlich hinwegziehen, geradeso wie wir einen Handschuhfinger über den Finger ziehen.

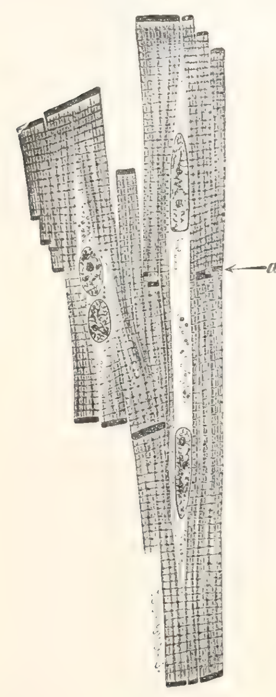


Fig. 3. Muskelfasern aus dem Herzen des Menschen. Aus Heidenhain, Plasma und Zelle.

Der Herzmuskel nimmt in bezug auf seine Funktion zwischen quergestreiften und glatten Muskeln eine Mittelstellung ein. Er besteht aus quergestreiften Muskelfasern, die miteinander Verbindungen aufweisen (Fig. 3). Die quergestreiften Fasern des Herzens können jedoch nicht willkürlich innerviert werden. Die Bewegung des Herzens ist eine peristaltische.

Bei den wirbellosen Tieren finden wir quergestreifte Muskeln, welche die röhrenförmigen Körperwandungen der Tiere bilden und in Abhängigkeit vom Zentralnervensystem peristaltische Bewegungen ausführen; wir finden glatte Muskeln, welche zwei gelenkig miteinander verbundene Teile des Tierkörpers bewegen, indem sie sich einfach verkürzen. Bei den Wirbellosen besteht wohl die histologische Differenzierung in quergestreifte und glatte Muskeln, doch eine funktionelle Differenzierung, wie wir sie im Wirbeltierkörper beobachten, besteht nicht. Die quergestreiften Muskeln treten dort auf, wo schnellere Bewegungen notwendig sind, während die glatten Muskeln nur langsame Bewegungen vermitteln oder durch andauernde Verkürzung einen Teil des Körpers feststellen.

Alle Muskeln besitzen die gemeinsame Eigenschaft, bei der Verkürzung ihre Oberfläche zu verkleinern ohne an Volumen abzunehmen. Für die einzelnen Muskeln ist die Geschwindigkeit, mit der sie sich verkürzen, charakteristisch. Die quergestreiften Flügelmuskeln der Insekten können sich über 300 mal in der Sekunde verkürzen, während die Schließmuskeln der Muschelschalen, selbst Minuten zu einer Verkürzung brauchen können. Zwischen diesen beiden Extremen liegt eine große Reihe von Muskeln mit verschiedenen Reaktionsgeschwindigkeiten. Dient ein Muskel flinkeren und langsameren Bewegungen, so finden wir ihn häufig aus Fasern verschiedener Reaktionsgeschwindigkeit zusammengesetzt (Grützner).

b) Chemischer Aufbau der Muskeln.

Die Säugetiermuskel besteht zu 75 % aus Wasser, die Muskeln niedrigerer Tiere ebenso wie die embryonalen Muskeln besitzen einen noch größeren Wassergehalt. Mit dem größeren Wassergehalt geht in der Regel eine geringere Reaktionsgeschwindigkeit einher. Im übrigen enthalten die Muskeln, wie alle Formen lebendiger Substanz, wichtige organische und anorganische Stoffe. Zu den organischen Bestandteilen der Muskeln gehören die Eiweißkörper, die Kohlehydrate und die Fette und einzelne durch Extraktion zu gewinnende Stoffe, wie die Milchsäure. Zu den anorganischen Bestandteilen gehören gewisse Salze und Kohlensäure, welche aus dem Muskel ausgepumpt werden kann und aus dem Stoffwechsel des Muskels stammt.

Eiweißkörper. Es wird unterschieden ein globulinartiger Eiweißkörper, das Myosin, ein albuminartiger Eiweißkörper, das Myogen. Bei verschiedenen Muskelarten haben diese Eiweißkörper eine verschieden hohe Koagulationstemperatur. Sie haben ferner die bei verschiedenen Muskeln verschieden stark entwickelte Fähigkeit zu gerinnen. Es ist dies ein Vorgang, der offenbar unter dem Einfluß fermentativer Prozesse erfolgt. Manche Autoren setzen die Gerinnung der Muskeleiweißkörper zur Blutgerinnung in Beziehung, von v. Fürth wird dies jedoch bestritten.

Kohlehydrate. Unter den Kohlehydraten besitzt das Glykogen die größte Bedeutung. Es ist im Muskel in Form kleiner Körnchen als Reservestoff eingelagert. Die übrigen Kohlehydrate des Muskels, das Dextrin und der Traubenzucker, stehen zum

Glykogen in naher Beziehung. Sie dienen entweder zum Aufbau oder sind Abbauprodukte des Glykogens. Durch das Blut wird dem Muskel nur Traubenzucker (Dextrose) zugeführt.

Fette. Die Muskeln haben unter Umständen einen großen Gehalt an Fett. Werte von 4—30 % kommen zur Beobachtung.

Extraktivstoffe. Von den stickstoffhaltigen Extraktivstoffen sind zu nennen: Kreatin und Kreatinin, die Purinbasen, Hypoxanthin, Xanthin, Guanin, Karnin, zu den stickstofffreien gehört in erster Linie die Milchsäure, welche aus dem Stoffwechsel der Eiweißkörper und Kohlehydrate stammt.

Anorganische Bestandteile. Im Muskel kommen die phosphorsauren Salze des Kaliums, Magnesiums, Calciums und Kochsalz vor. Ihre Menge beträgt ungefähr 1 %.

c) Die physikalischen Eigenschaften der Muskeln. Die Konsistenz der Muskeln muß wie die jeder lebendigen Substanz flüssig sein. Corpora non agunt nisi soluta. Die Flüssigkeit enthält heterogene Substanzen. Die flüssige Konsistenz des Sarcoplasmas wurde von Kühne durch die Beobachtung festgestellt, daß Muskelparasiten in ihm förmlich schwimmen können. Dagegen ist es wahrscheinlich, daß die Fribillen fest sind. Eine gewisse Ordnung ihrer Teile ist schon durch ihr optisches Verhalten gegeben.

Sehr viel untersucht ist das optische Verhalten der Muskelfasern. Nach Engelmann kommt allen Substanzen, in welchen Spannungen auftreten, die Eigenschaft zu, die Polarisationsebene des Lichtes zu drehen. Sämtliche Muskel weisen in der Tat die Eigenschaft der positiven Doppelbrechung auf. Sie sind optisch einachsig, ihre optische Achse liegt in der Richtung der Verkürzung.

Die Querstreifung der Muskeln kommt durch die abwechselnde Aufeinanderfolge stärker und schwächer lichtbrechender Schichten zustande (Fig. 4). Im polarisierten Licht scheint die Faser aus einzelnen Kästchen, den sogenannten Muskelelementen zu bestehen, welche durch helle Zwischenscheiben voneinander getrennt sind. In der Mitte der Kästchen befindet sich die doppeltbrechende Schicht. An die Zwischenscheiben grenzen einfach lichtbrechende Schichten. So besteht jedes Muskelelement aus einer doppeltbrechenden Schicht, die von zwei einfachbrechenden begrenzt wird. Bei der Verkürzung wird die doppeltbrechende Schicht kompakter, die einfachbrechende lichter. Es scheint die anisotrope Schicht auf Kosten der isotropen zuzunehmen. Hürthle hat in jüngster Zeit der Engelmannschen Beschreibung des Verkürzungsvorganges modifiziert. Nach Hürthles Präparaten soll es sich gerade umgekehrt verhalten. Die Verkürzung soll durch den doppeltbrechenden Abschnitt der Faser allein bewirkt werden, der sich verkürzt und seine Oberfläche verkleinert, ohne sein Volumen zu ändern. Der einfachbrechende Teil soll an der Verkürzung nicht beteiligt sein. Es sei ferner erwähnt, daß die eingehenden Untersuchungen eine ganze Reihe von Schichtungen (Z, N, Q) in den einzelnen Muskelelementen gezeigt haben, über deren Deutung, Benennung und Beteiligung am Kontraktionsakt die Diskussion noch nicht geschlossen ist.

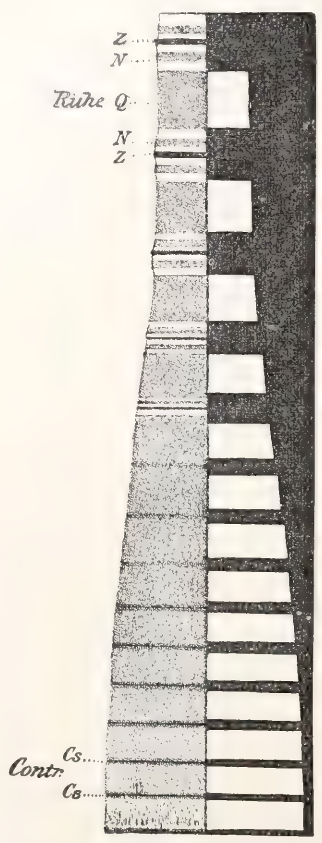


Fig. 4. Muskelfaser von Telephorus melanurus, in gewöhnlichem Lichte — links — und in polarisiertem Lichte — rechts, das obere Ende der Faser in ruhendem, das untere in kontrahiertem Zustande. Nach Th. W. Engelmann. Aus Heidenhain, Plasma und Zelle.

Die Elastizität der Muskeln ist eine wichtige physikalische Eigenschaft der Muskeln. Sie ist nicht groß, aber sie ist eine vollkommene, indem der gedehnte Muskel nach Aufhören der Dehnung immer wieder seine Anfangslänge annimmt. Von

den nichtorganisierten elastischen Körpern unterscheiden sich die Muskel dadurch, daß die Dehnung nicht dem spannenden Gewicht proportional ist. Bei gleichmäßig anwachsender Belastung wächst die Dehnung nicht entsprechend, sondern die Zunahme der Dehnung wird um so geringer, je größer die Belastung wird. Die Angaben, daß der tätige und der ermüdete Muskel eine andere Elastizität als der ruhende Muskel besitzen, ist wohl der Hauptsache nach auf die verschiednen Muskellängen zurückzuführen, von denen die Untersuchungen ausgehen. Dieselbe ist bei dem ermüdeten Muskel eine andere als beim tätigen und beim ruhenden Muskel.

Im besonderen Grade sind lange parallelfaserige quergestreifte und die glatten Muskeln dehnbar. Da bei den letzteren die Dehnung als Reiz wirkt, welcher an sich Erregung und Verkürzung des Muskels auslöst, sind die Versuche an glatten Muskeln nur unter Schwierigkeiten auszuführen und schwer zu deuten.

2. Die Lebensbedingungen der Muskeln. Soll ein Muskel funktionieren, so müssen eine Reihe von Bedingungen erfüllt sein. Die Gesamtheit dieser Bedingungen bezeichnen wir als Lebensbedingungen. Die wichtigsten äußeren Lebensbedingungen der Muskeln sind folgende:

a) Der Sauerstoff. Wird ein Muskel aus dem Körper ausgeschnitten, so verliert er in kürzerer oder längerer Zeit seine Erregbarkeit. Diese Zeit ist abhängig von der Reaktionsgeschwindigkeit des Muskels. Je größer die Reaktionsgeschwindigkeit des Muskels, je intensiver die Stoffwechselvorgänge im Muskel sind, um so früher wird das ihm zur Verfügung stehende Material verbraucht sein, und um so schneller werden sich Dissimilationsprodukte anhäufen, welche ihn lähmen. Darauf ist es zurückzuführem, daß die Muskeln der Warmblüter rascher absterben, daß der Absterbeprozeß bei höherer Temperatur schneller verläuft als bei niedriger. Der Froschmuskel verliert bei einer Temperatur von 30° schon nach wenigen Stunden seine Erregbarkeit, bei niedriger Temperatur kann er bis 10 Tage erregbar bleiben. Die Muskeln Hingerichteter wurden im Winter 15 Stunden nach der Hinrichtung noch erregbar gefunden. Das Herz pulsierte noch 24 Stunden. Beim Katzenherz war das Pulsieren selbst mehrere Tage nach der Tötung des Tieres noch zu beobachten. Manche glatte Muskeln sind sehr vom Sauerstoff abhängig. Wie F. B. Hofmann gezeigt hat, geraten die Chromatophorenmuskeln der Cephalopoden nach Tötung des Tieres in einen Zustand dauernder Verkürzung. Wird durch Auflegen eines leichten Deckgläschens der Zutritt des Sauerstoffs zu den Chromatophorenmuskeln verhindert, so erschlaffen sie, die Haut des Tieres wird hell. Wird der Zutritt des Sauerstoffs von neuem gestattet, so kontrahieren sich die Muskeln wieder. Andere glatte Muskeln zeigen dagegen eine äußerst geringe Abhängigkeit vom Sauerstoff.

Auch der im lebenden Tierkörper befindliche Muskel wird unerregbar, wenn seine Blutzirkulation aufgehoben wird (Stesonscher Versuch). Durch Herstellen des Blutkreislaufes kann die Erregbarkeit wiederkehren. Entsprechendes zeigen die Versuche mit künstlicher Durchspülung ausgeschnittener Muskeln mit arteriellem Blut, selbst mit sauerstoffhaltiger Lösung, welche Salze und Nährstoffe in notwendiger Menge enthält.

Es ist interessant, daß gleichzeitig mit der Innervation der Muskeln die Muskelgefäße weiter werden. Es wird dies nicht nur allein durch die Verkürzung der Muskeln herbeigeführt, welche bewirkt, daß der Gefäßschlauch kürzer und weiter wird, sondern die Erweiterung kommt durch Erregung der gefäßerweiternden Nerven zustande. Diese Tatsache haben besonders die Untersuchungen von Ernst Weber gezeigt. Es genügt schon der intensive Wunsch allein, einen Muskel zu bewegen, um eine Erweiterung der Gefäße dieses Muskels herbeizuführen. Durch diesen Mechanismus wird ein ausdauernderes Arbeiten der Muskeln ermöglicht.

Die Totenstarre. Wenn ein Muskel abstirbt, wird er totenstarr. Die Muskeln verkürzen und verdicken sich, wenn sie totenstarr werden; es ist dies ein Vorgang, welcher, wie Hermann hervorgehoben hat, in naher Beziehung zum Kontraktionsakt des Muskels steht. Die Muskeln, welche totenstarr werden, werden trübe, es wird Wärme produziert, es tritt eine Säuerung auf, es läßt sich eine gesteigerte Kohlensäureproduktion nachweisen: Prozesse, die wir auch bei der Kontraktion feststellen können.

Die Totenstarre tritt im allgemeinen um so früher ein, je intensiver die Stoffwechselvorgänge im Muskel vor dem Tode waren. Höhere Temperatur, welche bei dem Eintritt des Todes herrschte, starke Anstrengungen, welche dem Tod vorausgingen, begünstigen den frühen Eintritt der Totenstarre. Die Warmblütermuskeln werden früher totenstarr als die Kaltblütermuskeln. Muskeln, welche mit ihrem Zentralnervensystem in Verbindung stehen, werden früher totenstarr als solche, deren Nerven durchschnitten sind; die Stoffwechselvorgänge dieser Muskeln sind nicht durch die ihnen andauernd vom Zentralnervensystem zugehenden Erregungen gesteigert.

Unter besonderen Umständen kann die Totenstarre schon im Moment des Todes

eintreten. Es liegen viele Angaben vor, welche dies zeigen. Soldaten, welche nach großen körperlichen Anstrengungen vom Tode überrascht wurden, wurden in der charakteristischen Stellung, welche sie im Moment des Todes eingenommen hatten, totenstarr aufgefunden. Die Untersuchungen Mangolds zeigen die interessante Tatsache, daß totenstarre Muskeln durch Einlegen in physiologische Kochsalzlösung wieder erregbar gemacht werden können.

Die Theorie der Totenstarre nimmt an, daß sie durch Gerinnung derselben Eiweißkörper zustande kommen, welche auch bei dem Kontraktionsakt beteiligt sind. Die Lösung der Totenstarre soll durch Lösung des geronnenen Myosins durch die sich bildende Säure erfolgen.

b) Der Wassergehalt. Die Funktion eines Muskels wird durch seinen Gehalt an Wasser beeinflußt. Möglicherweise ist aber das Wasser im Muskel nur als Quellungswasser enthalten. Wird der Wassergehalt eines Muskels vermindert, indem der Muskel in Lösungen eingelegt wird, welche ihm Wasser entziehen, oder ist der Muskel der Vertrocknung ausgesetzt, so nimmt bis zu einer gewissen Grenze die Erregbarkeit wesentlich zu. Dies äußert sich auch in einer fibrillären Unruhe des Muskels, d. h. die einzelnen Fasern zucken unabhängig voneinander. Wird dagegen durch destiliertes Wasser oder eine hypotonische Lösung der Wassergehalt eines Muskels gesteigert, so sinkt seine Erregbarkeit und schließlich wird er in einem Zustand der Wasserstarre unerregbar. Durch Wasserentziehung kann der wasserstarre Muskel seine Kontraktilität wiederbekommen.

c) Die Salze. Für die Muskeltätigkeit ist die Anwesenheit bestimmter Salze von großer Wichtigkeit, insbesonders sind es die Chlorverbindungen und die phosphorsauren Salze der Erdalkalien, welche als Elektrolyte in Beziehung zu den in den Muskeln enthaltenen Kolloïden bei einer Reihe wichtiger Lebenserscheinungen enge beteiligt sind. Hier ist die Elektrizitätsproduktion und der Prozeß der Erregungsleitung zu nennen. Die hierhergehörenden Beobachtungen verdanken wir nebst vielen Forschern insbesondere Nasse, Overton, Höber.

Es gibt Lösungen, in welchen ein ausgeschnittener Muskel weder Wasser aufnimmt noch abgibt. Diese Lösungen bezeichnen wir als isotonisch. Eine Lösung, zu welcher der Muskel seine Erregbarkeit längere Zeit unverändert behält, bezeichnen wir als eine physiologische. Am meisten wird die physiologische Kochsalzlösung von 0,6 bis 0,9% verwendet und die Ringerlösung, welche sich in vielen Fällen besser bewährt; sie enthält noch geringe Mengen von Calcium- und Kaliumsalzen.

Der Muskel verliert in einer salzfreien, isotonischen Rohrzuckerlösung seine Erregbarkeit, bleibt aber erregbar, wenn der Lösung 0,07 % Kochsalz hinzugefügt wird. Geringere Mengen von Natriumchlorid sind nicht imstande, den Muskel erregbar zu erhalten. Das Natrium kann mit Erfolg durch Lithium, Caesium, Calcium, Barium oder Magnesium ersetzt werden. Kalium und Ammonium dagegen haben in Mengen, die ihr normales Vorkommen überschreiten, eine schädigende Wirkung, die sich darin äußert, daß der Muskel unerregbar wird, seine für Salze undurchlässige Plasmahaut ihre Undurchlässigkeit verliert und der Muskel Wasser aufnimmt. Den Moment der Wasseraufnahme und die Größe derselben hat Overton durch Wägung bestimmt.

Gewisse Elektrolyte haben eine erregende Wirkung. Wie die Untersuchungen von Biedermann am Schneidermuskel des Frosches gezeigt haben, veranlassen geringe Mengen von Natriumphosphat und Natriumkarbonat rhythmische Kontraktionen. Die gleiche Wirkung können auch Bariumsalze ausüben.

d) Die Säuren. Wie wir weiter unten bei Besprechung der Stoffwechselvorgänge im Muskel hören werden, erfährt der Muskel während seiner Tätigkeit eine Säuerung. Die Säuren rufen besonders leicht eine Zustandsänderung der im Muskel enthaltenen kolloidalen Stoffe herbei, die sich in einer Gerinnung äußert. Wir sprechen im Falle einer durch Säure veranlaßten Gerinnung der Muskeleiweißkörper von einer Säurestarre.

e) Die Temperatur. Die Muskeltätigkeit ist eine Funktion der Temperatur. Es gilt auch für den Muskel die van't Hoffsche Regel $Q_{10} = 2—2,5$. Die Reaktionsgeschwindigkeit eines Muskels gemessen an der Geschwindigkeit der Erregungsleitung erfährt bei einer Temperaturerniedrigung um 10^0 eine Verlangsamung auf das Doppelte des anfänglichen Wertes.

Nur bei einer optimalen Temperatur, welche je nach den Lebensbedingungen des Tieres, von welchem der Muskel stammt, verschieden ist, laufen die Erregungsvorgänge mit einer solchen Intensität und Geschwindigkeit ab, daß in der Ruhe sich Verbrauch an Material und der Wiederersatz das Gleichgewicht halten. Bei Temperaturen, welche niedriger als die optimale ist, sind insbesonders die Restitutionsprozesse, welche in dem Ersatz des Verbrauchsmaterials und in dem Abtransport der Dissimilationsprozesse bestehen, stärker verlangsamt als die Zerfallsprozesse im Muskel. Der Muskel arbeitet, wenn er erregt wird, träger, er ermüdet leichter. Ist die Temperatur höher als die optimale, dann sind die Zerfalls-

prozesse so gesteigert, daß der Widerersatz des im Stoffwechsel verbrauchten Materials und die Entfernung der Dissimilationsprodukte, nicht folgen kann. Es tritt infolgedessen leicht Ermüdung oder Erstickung ein. Der Muskel verfällt in den Zustand der Wärmelähmung, die bei Abkühlung des Muskels wieder rückgängig gemacht werden kann. Sie unterscheidet sich dadurch von der Wärmestarre, von der sich der Muskel nicht mehr erholen kann.

f) Die vom Zentralnervensystem kommenden Erregungen. Arbeitshypertrophie. Inaktivitätsatrophie. Entartung. Die vom Zentralnervensystem zum Muskel gelangenden Erregungswellen sind für seine Funktion von großer Bedeutung. Gerade bei den Muskeln tritt uns mit großer Deutlichkeit die für jede lebendige Substanz geltende Tatsache entgegen, daß kein Leben ohne die von außen kommenden Reize bestehen kann. Treffen einen Muskel nur schwache und seltene Reize, wird er nur wenig in Anspruch genommen, so verfällt er der Inaktivitätsatrophie. Bei häufiger und starker Inanspruchnahme weist er die Aktivitätshypertrophie auf. Diese äußert sich in einer Massenzunahme der einzelnen Muskelfasern, nicht in einer Zunahme der Zahl der Zellelemente, welche den Muskel zusammensetzen. Wird der motorische Nerv eines Muskels durchtrennt, so wird seine Reaktion immer träger, seine Reaktion auf Reize verändert sich tiefgehend und schließlich degenerieren die Muskelfasern und gehen zugrunde. Wir sprechen von einer Entartung des Muskels. Die veränderte Reaktion der entartenden Muskeln auf Reize, insbesonders auf elektrische Reize, soll erst bei Besprechung der Produktion mechanischer Energie behandelt werden. Die Gesamtheit der Entartungserscheinungen wird als Entartungsreaktion bezeichnet. Früher hat man dem Zentralnervensystem in bezug auf den Muskel eine trophische Funktion zugeschrieben. Jetzt aber wissen wir, daß die von außen kommenden Erregungen eine wichtige Bedingung für den Fortbestand des Lebens vorstellen. Das geht mit besonderer Deutlichkeit auch aus der Tatsache hervor, daß der Eintritt der Entartung eines Muskels, dessen Verbindung mit dem Zentralnervensystem durchtrennt ist, verzögert werden kann, wenn der Muskel oft und stark gereizt wird.

3. Die Wirkung von Reizen auf den Muskel. a) Definition des Reizbegriffes. Erregung und Lähmung. Erregbarkeit. Erregungsleitung. Als Reiz definiert Verworn jede Veränderung in den äußeren Lebensbedingungen. Die Veränderung kann zu einer Verlangsamung oder Beschleunigung der Lebensvorgänge führen, der Reiz kann erregend oder lähmend wirken. Temperatursteigerung z. B. beschleunigt die Lebensvorgänge, Temperaturherabsetzung verlangsamt sie. Abnahme des Wassergehaltes beschleunigt die Lebensvorgänge, Zunahme des Wassergehaltes verlangsamt sie usf.

Die Beschleunigung der Lebensvorgänge im Muskel durch einen Reiz wird als Erregung, die Fähigkeit des Muskels einen Reiz mit einer Beschleunigung der Lebensvorgänge zu beantworten, wird als Erregbarkeit bezeichnet. Ist eine Muskelfaser erregt, so leitet sie die Erregung von einem Ende der Faser zu dem anderen. Die Erregungsleitung kann nur dadurch erfolgen, daß ein Teilchen, das sich in Erregung befindet, das Nachbarteilchen der Faser in Erregung versetzt. Dazu muß das Nachbarteilchen erregbar sein. Auch bei den Muskeln ist die Funktion der Erregbarkeit und der Erregungsleitung enge miteinander verknüpft.

Bei den quergestreiften Muskeln findet ein Ueberspringen der Erregung von einer Muskelfaser zu anderen nicht statt, es gilt das Gesetz von der isolierten Leitung. Bei den glatten Muskeln und am Herzen wird dagegen die Erregung von Zelle zu Zelle geleitet. Die in den glatten Muskeln vielfach nachweisbaren Nervennetze haben, wie F. B. Hofmann gezeigt hat, mit der Erregungsleitung im Muskel nichts zu tun.

b) Adäquate und inadäquate Reizung. Wir bezeichnen diejenigen Reize, welche dem Muskel durch das Nervensystem vermittelt werden als adäquate. Adäquate Reize sind also solche, die durch Erregung eines Teiles eines Reflexbogens zur Kontraktion des Muskels führen. Doch machen sich schon geringe Unterschiede in der Muskelreaktion geltend, wenn wir ihn durch Reizung der Sinnesorgane, oder der sensiblen Nerven, oder des Zentralnervensystems oder schließlich der motorischen Nerven erregen. Es hängt dies mit der verschiedenen Reaktion der einzelnen Teile des Reflexbogens auf Reize enge zusammen. Inadäquat ist die direkte Reizung des Muskels. Die Reizung des Muskels vom Nervensystem aus, wird auch als indirekte Muskelreizung bezeichnet.

c) Die Angriffsstelle der Reize. Das Nervenendorgan. Die rezeptive Substanz. Die Wirkung von Curare, Nikotin, Atropin, Adrenalin auf die rezeptive Substanz. Der Muskel ist für den indirekten Reiz viel erregbarer als für den direkten, doch ermüdet der Muskel bei indirekter Reizung viel früher, er verliert

unter der Wirkung des Sauerstoffmangels viel früher seine indirekte Erregbarkeit. Viele Autoren verlegen diese stärker hervortretende Ermüdbarkeit, die größere Empfindlichkeit gegenüber Sauerstoffmangel in die auch histologische differenzierbare Nervenendplatte des Muskels. Das ist die hügelige Anschwellung, innerhalb welcher die Nervenfaser auf die Muskelfaser übergeht. Innerhalb der Nervenendplatte erfährt die Erregungswelle eine Verlangsamung unter Umständen auch ein Dekrement, das heißt eine Abnahme ihrer Intensität. In der Nervenendplatte soll auch das Curare das Pfeilgift der südamerikanischen Indianer angreifen. Ein mit dem Pfeilgift vergiftetes Tier liegt vollkommen gelähmt da, das Herz schlägt aber noch. Es war Claude Bernard, welcher in einem klassischen Versuch den Angriffsort des Curare feststellte. Claude Bernard unterband einem Frosch die eine Unterschenkelarterie, dann injizierte er ihm eine Curarelösung in den Rückenlymphsack. Nach einiger Zeit trat Lähmung ein, doch konnten von allen Körperteilen aus Bewegungen des von der Vergiftung ausgesparten Beines erhalten werden. Es konnte demnach das Curare nicht angreifen an den Sinnesorganen, an den sensiblen und motorischen Nerven, am Zentralnervensystem, welche vom curarehaltigen Blut umspült waren. Uebrig blieb nur der Muskel als Angriffspunkt des Curare. Doch konnte Claude Bernard durch direkte Reizung der Muskeln zeigen, daß dieselben noch erregbar waren. Es kam demnach nur die Uebergangsstelle von Nerv zu Muskel als Angriffspunkt des Curare in Betracht. Da sich an der Uebergangsstelle der Nervenendhügel befindet, lag es nahe, die Curarewirkung in denselben zu verlegen.

Die Untersuchungen von Langley und seiner Schule haben jedoch gezeigt, daß der Angriffspunkt des Curare nicht in den histologisch nachweisbaren Endplatten gelegen sein kann, denn die Nervenendplatte stellt gar nicht das Nervenende vor (Fig. 5). Die Nervenfasern lassen sich noch jenseits des Endhügels eine Strecke weit zwischen Sarkolemm und Sarkoplasma verfolgen. Langley bediente sich bei seinen Versuchen des von ihm entdeckten Antagonismus von Curare und Nikotin. Nikotin erregt viele Muskeln, Curare lähmt sie, eine neue Nikotingabe erregt die Muskeln wieder usf. Dieser Antagonismus besteht noch, wenn die feinsten Nervenästchen nach vorhergehender Durchschneidung der Nerven degeneriert sind. Daraus schloß Langley, daß das Curare an einer zu dem Muskel gehörigen, reizaufnehmenden, rezeptiven Substanz angreift, welche sich vorzugsweise an den Uebergangsstellen von Nerv und Muskel findet. Das von Claude Bernard behandelte Problem hat durch diese Untersuchungen Langleys eine wesentliche Vertiefung erfahren. Möglicherweise handelt es sich bei der rezeptiven Substanz nur um eine Phasen-

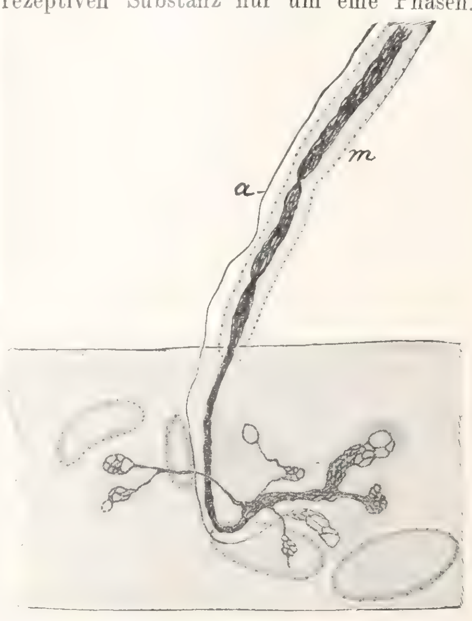


Fig. 5. Motorische Platte aus der Rückenmuskulatur einer erwachsenen Lacerta agilis. Nach Boeke 1909. a akzessorische marklose Faser, welche in die Platte eindringend ein kleines Endnetzchen bildet. m motorischer Nerv. Aus Heidenhain, Plasma und Zelle.

verschiedenheit zwischen Nerv und Muskelsubstanz. Wir haben eine entsprechende Phasenverschiedenheit auch im Zentralnervensystem an den Uebergangsstellen eines Nervenendbäumchens einer Nervenzelle zum Zelleib einer zweiten vor uns. Diese Stelle wird von Sherrington als Synapse bezeichnet, in dieselbe wird die Gesamtheit der für das Zentralnervensystem charakteristischen Eigenschaften verlegt. In der Tat kann aber auch die rezeptive Substanz eines Muskels alle die Eigenschaften einer Synapse wie Summation schwacher Reize, scheinbare Bahnung, Hemmung usf. aufweisen. Einzelne Muskeln verhalten sich ganz so, als ob ihnen nervöse Zellelemente enthalten wären. Das gilt in besonderem Maße für die Krebsscherenmuskeln, das gilt in vieler Beziehung für viele glatte Muskeln der Wirbeltiere, welche vom vegetativen Nervensystem aus innerviert werden. Bei diesen Muskeln ist die rezeptive Substanz auch der Angriffsort einiger Gifte, wie des Atropins, des Adrenalins, des Muskarins, welche die Funktion der Muskeln entsprechend der Nikotin- und Curarewirkung

am quergestreiften Muskel entweder steigern oder lähmen. Eine solche Phasenverschiedenheit müssen wir nach Nernst an allen lebendigen Zellen annehmen, wenn wir sie in Beziehung zum umgebenden Medium setzen. Indem sich eine solche Phasenverschiedenheit wie eine Membran verhält, kann sie zu einer Verlangsamung der Reaktionsgeschwindigkeit des Erregungsvorganges und damit zu einem Hervortreten der für die Zentralnervensysteme charakteristischen Eigenschaften führen. Das Hervortreten dieser Eigenschaften ist, wie durch die Untersuchungen Fröhlichs nachgewiesen worden ist, in besonderem Maße von der Reaktionsgeschwindigkeit abhängig.

d) Die Reizqualitäten. Neben den adäquaten Reizen kommen für den Muskel eine Reihe von Reizqualitäten in Betracht, vor allem der elektrische, der mechanische, chemische, osmotische und thermische Reiz.

In einzelnen Fällen wirkt auch der Lichtreiz auf die Muskeln, z. B. auf die glatten Muskeln des Sphincter iridis und die Chromatophorenmuskeln der Cephalopoden.

α) Der elektrische Reiz. Für die Untersuchung der Muskelfunktion kommt in erster Linie der elektrische Reiz in Betracht, der durch Mateucci und Du Bois Reymond in die Physiologie eingeführt worden ist. Insbesondere Du Bois Reymond hat sich um die Ausbildung der elektrischen Reizmethode große Verdienste erworben. Eine Beschreibung der elektrischen Reizmethode hat jüngst Garten gegeben.

Der elektrische Reiz kann vorzugsweise in drei Formen angewendet werden, als konstanter Strom, wie ihn unsere galvanischen Elemente liefern, als Induktionsstrom und in Form von Kondensatorenentladungen.

Die Intensität des konstanten Stromes kann durch die Zahl und die Schaltung der verwendeten Elemente variiert werden oder es kann dies durch Einschaltung von Widerständen in den Hauptkreis oder die Einführung von Nebenschließungen geschehen.

Der elektrische Strom kann ferner in Form von Induktionsströmen, als Schließsungs- und Oeffnungsinduktionsstrom, oder bei schneller Folge der Schläge als faradische Reizung Anwendung finden. Die Spannung der Induktionsströme ist eine hohe, sie hängt von der Geschwindigkeit der Schließung und Oeffnung des Stromes im primären Kreis und von der Anzahl der Wicklungen des sekundären Kreises des Induktionsapparates ab. Die Intensität des Induktionsstromes wird durch Variieren der Stromstärken im primären Kreis oder durch Entfernen der sekundären Spirale von der primären des Induktoriums abgestuft. Auch Magnetoinduktion findet häufige Anwendung.

Schließlich wird der elektrische Strom in Form von Kondensatorenentladungen verwendet, die für einzelne Fragen der Reizphysiologie besonders geeignet erscheinen. Die Menge der durch den Muskel gesendeten Elektrizität ist zu berechnen, wenn die Kapazität des Kondensators bekannt ist und das Potential, zu dem er geladen wurde.

Der Muskel ist für den elektrischen Strom ein Leiter hohen Widerstandes. Der Widerstand kann 2 bis 3 millionenmal größer sein als der Widerstand eines metallischen Leiters. Der Widerstand ist ebenso wie der metallischer Leiter von der Temperatur abhängig. Der Muskel wird beim Durchleiten eines Stromes polarisiert, es läßt sich in ihm dann ein dem zugeführten Strom entgegengesetzter Strom nachweisen.

Bei Reizung des Muskels mit einem konstanten Strom lassen sich gewisse Gesetzmäßigkeiten nachweisen, deren Gesamtheit als das Gesetz der polaren Erregung bezeichnet wird. Für die Wirkung eines Stromes ist seine Dichte und die Steilheit, mit welcher er einwirkt, von Bedeutung. Muskeln mit großer Reaktionsgeschwindigkeit reagieren besser auf Ströme steileren Verlaufes, bei diesen Muskeln kann man galvanische Ströme von beträchtlicher Intensität durch langsames Verstärken einschleichen, während bei Muskeln mit träger Reaktion ein Einschleichen des Stromes nicht möglich ist. Die Gesetzmäßigkeiten der polaren Erregung sind folgende: 1. Die Schliessung des Stromes wirkt stärker als die Oeffnung; 2. bei der Schließung geht die Kontraktion von der Kathode, bei der Oeffnung des Stromes von der Anode aus; 3. bei Schließung des Stromes ist die Erregbarkeit an der Kathode erhöht, an der Anode herabgesetzt, bei der Oeffnung ist es umgekehrt.

Da der Muskel bei Schließung des Stromes eine Zuckung zeigt, welche von der Kathode ausgeht, bei der Oeffnung eine Zuckung, welche von der Anode ausgeht, so spricht man auch von einem Zuckungsgesetz.

Die Feststellung des Zuckungsgesetzes und seine Veränderungen durch Erkrankung des Nervenmuskelsystems findet in der internen Medizin, insbesonders in der Neurologie häufige Anwendung. Zu diesem Zweck wird eine breite Elektrode an eine indifferente Stelle des Körpers angelegt, die kleine, differente Elektrode liegt auf dem zu prüfenden Muskel. Ist der Muskel normal und ist die Kathode an ihn angelegt, so erhält man bei Schließung schwacher Ströme eine Zuckung, welche als Kathodenschliessungszuckung (K.S.Z.) bezeichnet wird. Liegt die Anode dem Muskel an, so erhält man bei der Schließung des Stromes nichts,

bei der Oeffnung eine Anodenöffnungszuckung (A.Oe.Z.). Bei der Entartung der Muskeln oder anderen Erkrankungen und Schädigungen kann man neben den schon oben erwähnten Symptomen der Entartungsreaktion eine Umkehr des Zuckungsgesetzes beobachten. Es kann die Anodenschließungszuckung (A.S.Z.) stärker sein als die Kathodenschließungszuckung.

Ueber die Theorie der Umkehrung des Zuckungsgesetzes ist die Diskussion noch nicht geschlossen, in jüngster Zeit ist von Reiß eine zusammenfassende Arbeit über die elektrische Entartungsreaktion erschienen, welche dieselbe auf Grund der Nernstschen Anschauungen von der Wirkung des elektrischen Reizes zu erklären versucht.

β) Der mechanische Reiz hat weit weniger in der Reizphysiologie Anwendung gefunden als der elektrische Reiz. Er läßt sich weniger leicht dosieren und führt, wenn er nicht sehr vorsichtig angewendet wird, leicht eine Zerstörung der Muskelsubstanz herbei. Muskeln mit geringer Reaktionsgeschwindigkeit sind für den mechanischen Reiz empfindlicher. Die Applikation des mechanischen Reizes geschieht mit Hilfe kleiner Hämmer. Für schnell aufeinanderfolgende Reizungen dient der Tetanomotor von Heidenhain. Für Einzelreize ist von F. B. Hofmann und Blaas ein handlicher Apparat gebaut worden, mit welchem diesen Autoren der Nachweis gelang, daß diejenigen Stellen der Muskeln, an welchen sich die meisten Nervenenden befinden, die höchste Erregbarkeit besitzen, auch wenn der Muskel kuraresiert ist.

Auf die Wirkung chemischer, osmotischer und thermischer Reize wurde schon oben bei Besprechung der allgemeinen Lebensbedingungen hingewiesen. Auch diese Reizarten finden in der Reizphysiologie verhältnismäßig wenig Anwendung, weil sie sich nicht so fein abstufen lassen wie der elektrische Reiz. Da sie aber Reize sind, welche sehr langsam auf die lebendige Substanz einwirken, so finden sie mit Erfolg bei Muskeln Anwendung, welche eine geringe Reaktionsgeschwindigkeit besitzen. So werden, wie wir oben gesehen haben, durch Sauerstoffzufuhr, die glatten Chromatophorenmuskeln der Cephalopoden zur Kontraktion gebracht.

e) Die Reizdauer. Für die Wirksamkeit eines Reizes ist seine Dauer und sein zeitlicher Verlauf von großer Bedeutung. Dies zeigen mit großer Deutlichkeit die Versuche mit dem elektrischen Reiz. Die Dauer und der zeitliche Verlauf der anderen Reizarten lassen sich nicht leicht abstufen.

Der Induktionsstrom hat eine außerordentlich kurze Dauer und einen sehr steilen Verlauf, der konstante Strom kann unbegrenzt lange auf den Muskel einwirken, sein zeitlicher Verlauf kann mit Hilfe eigener Apparate, der Rheonome variiert werden. Auf den Induktionsstrom reagieren die Muskeln mit großer Reaktionsgeschwindigkeit besonders gut, auf den konstanten Strom, auf den mechanischen, chemischen und thermischen Reiz reagieren die trägen, glatten Muskeln besser.

Entsprechendes kann man, wie Fröhlich und Reinecke gezeigt haben, auch beobachten, wenn man die Reaktionsgeschwindigkeit eines Muskels durch eine lähmende Beeinflussung verlangsamt.

Abkühlung, Ermüdung, Entartung vermindern im Beginn ihrer Einwirkung die Erregbarkeit des Muskels für den Induktionsschlag und steigern die Erregbarkeit für den konstanten Strom.

Es herrscht eine enge Beziehung zwischen der Wirkung verschieden lang dauernder Reize und der Reaktionsgeschwindigkeit des gereizten Muskels. Je größer seine Reaktionsgeschwindigkeit, um so größer seine Erregbarkeit für den schnellverlaufenden, kurzdauernden Reiz.

f) Die Reizintensität. Die Beziehung zwischen Reizgröße und Erregungsgröße läßt sich beim Muskel heute noch nicht in einheitlicher Weise fassen. Es bedarf einer bestimmten Reizgröße zur Erregung eines Muskels. Wir sagen die Reizschwelle des Muskels liegt bei dieser Reizstärke. Nimmt die Reizintensität zu, so nimmt bei den meisten Muskeln die Größe der Verkürzung zu und zwar bei gleichmäßig ansteigender Intensität der Reizung nimmt die Verkürzung nicht proportional zu, sondern immer weniger und weniger, bis sich schließlich keine wesentliche Zunahme der Verkürzung mehr feststellen läßt. Dieser jetzt erreichte Verkürzungsgrad wird als maximale Verkürzung, der Reiz, welcher eben eine maximale Verkürzung hervorruft, als maximaler Reiz, der schwächere als ein submaximaler, der stärkere als ein übermaximaler Reiz bezeichnet. Dasselbe Verhältnis wie zwischen Reiz- und Verkürzungsgröße kommt im Gebiete der Sinnesorgane im Weber-Fechnerschen Gesetz zum Ausdruck.

Aber nicht bei allen Muskeln zeigt sich das eben beschriebene Verhalten. Der Herzmuskel z. B. reagiert entweder auf einen Reiz gar nicht oder er reagiert gleich mit einer maximalen Verkürzung. Man spricht von einem Alles- oder Nichtsgesetz.

Keith Lucas ist geneigt, das gleiche Verhalten auch für den Froschmuskel anzunehmen. Keith Lucas führt das Anwachsen der Verkürzungsgröße bei Verstärkung des Reizes auf die Erregung einer größeren Zahl von Nervenfasern zurück. Die einzelne Muskelfaser soll sich entweder

gar nicht oder vollkommen kontrahieren. Daß das Anwachsen der Verkürzungsgröße mit zunehmender Reizstärke zum Teil auf der größeren Zahl der vom stärkeren Reiz getroffenen Nerven oder Muskelfasern beruht, ist nach den Versuchen Keith Lukas' kaum zweifelhaft. Es ist auf Grund dieser Versuche jedoch keineswegs mit Sicherheit zu schließen, daß der stärkere Reiz in der Muskelfaser auch eine stärkere Erregung auslöst.

g) Die Reizfrequenz. Die Wirksamkeit verschieden frequenter Reize ist gleichfalls von der Reaktionsgeschwindigkeit des Muskels abhängig. Je schneller die Reize einanderfolgen, um so kürzer dauert jeder einzelne Reizstoß. Auf kürzere Reize sprechen Muskeln mit großer Reaktionsgeschwindigkeit besser an. Werden sehr hohe Reizfrequenzen genommen, so ist es jeder einzelne Reizstoß weniger wirksam, es müssen daher höhere Reizintensitäten Anwendung finden, wenn der hochfrequente Reiz wirksam sein soll. Nach Nernst muß die Reizintensität mit der Quadratwurzel aus der Reizfrequenz ansteigen, um wirksam zu sein.

4. Energie- und Stoffwechsel des Muskels. a) Energetik der Muskeln. Das Gesetz von der Erhaltung der Energie gilt auch für die Muskeln. Energie- und Stoffwechselvorgänge sind bei den Muskeln auf das engste miteinander verknüpft, es kann im Muskel kein Energiewechsel ohne Stoffwechsel und kein Stoffwechselvorgang ohne Energiewechsel bestehen. Die Geltung des Satzes von der Erhaltung der Energie ist für lebendige Systeme durch die Untersuchung von Voit und Rubner festgestellt, seine Gültigkeit für den Muskel müssen wir unbedingt annehmen, wenn sich auch dem experimentellen Nachweis noch große Schwierigkeiten in den Weg stellen. Auch beim Muskel müssen die ihm zugeführten Energiemengen, gemessen durch ihren Kalorienwert, den bei der Tätigkeit zutagetretenden Energiemengen gleich sein.

Bei der Tätigkeit der Muskeln kommen in Betracht: 1. Die Produktion mechanischer Energie; 2. die Produktion elektrischer Energie; 3. die Produktion thermischer Energie; 4. der Verbrauch chemischer Energie.

b) Produktion mechanischer Energie. α) Die Muskelarbeit. Indem ein Muskel sich verkürzt, leistet er auf Kosten der in ihm aufgespeicherten chemischen Energie Arbeit, er setzt potentielle in kinetische Energie um.

Die geleistete Arbeit können wir messen, indem wir an den aus dem Tierkörper ausgeschnittenen Muskel oder an seine isolierte Sehne ein Gewicht anhängen und die Höhe bestimmen, bis zu welcher es gehoben wird. Für die Untersuchung der Muskelarbeit des Menschen sind eine Reihe von Apparaten, die Ergographen, konstruiert worden, welche gestatten durch geeignete Fixierung einer Gliedmaße, die Arbeitsleistung eines Muskels oder einer Muskelgruppe zu bestimmen.

Die Untersuchungen zeigten, daß der Muskel die weitaus vollkommenste Kraftmaschine ist, welche wir kennen; und doch kann der Muskel nur einen Bruchteil der ihm zugeführten Energie in mechanische Energie verwandeln. Sein Nutzeffekt beträgt im günstigsten Falle 35 %. Die besten unserer Kraftmaschinen haben nur einen Nutzeffekt von 15 %. Die Technik wird noch eine Menge von Arbeit aufwenden müssen, bis sie diese Leistung der Natur erreicht.

Der Muskel leistet nur äußere Arbeit, wenn er ein Gewicht hebt. Die äußere Arbeit wird gleich 0, wenn der Muskel sich unbelastet verkürzt — wir sehen hier von der gehobenen Eigenlast des Muskels ab —, die äußere Arbeit wird auch 0, wenn der Muskel so stark belastet ist, daß er sich nicht verkürzen kann, sie wird schließlich auch 0, wenn der verkürzte Muskel durch Reize im Zustand gleichmäßiger Verkürzung erhalten wird und ein Gewicht dauernd gehoben hält. In beiden letzteren Fällen äußert sich der gesteigerte Stoffwechsel in einer gesteigerten Wärmeproduktion.

Die Muskelarbeit hängt vom Querschnitt des Muskels ab. Je mehr Fasern er enthält, je stärker die einzelnen Fasern entwickelt sind und je länger der Muskel ist, um so größere Arbeit kann er leisten. Da aber die wenigsten Muskeln parallelfaserig — die meisten sind gefiedert, ihre Fasern setzen sich wie Federn an den Kiel an die Sehnen an — so berechnet man den Querschnitt des Muskels, indem man sein Volumen durch die mittlere Länge seiner Fasern teilt.

Unter absoluter Muskelkraft verstehen wir nach Eduard Weber das Gewicht, welches ein Muskel eben nicht mehr von der Unterlage abheben kann. Ein Wadenmuskel eines kräftigen Frosches hebt noch 1500 g, die Menschenmuskeln 6 bis 10 kg.

β) Die Muskelzuckung. Eine große Reihe von Untersuchungen haben sich mit dem zeitlichen Verlauf der Muskelkontraktion beschäftigt. Es ist zu diesem Zweck eine große Menge von Apparaten gebaut und eine Reihe sinnreicher Methoden ausgedacht worden.

Eine einfache Methode ist folgende:

Der eine Knochen, an welchem der Muskel sich ansetzt, wird in einer Muskelklemme befestigt, die Sehne des Muskels wird mit einem um eine Achse drehbaren

Schreibhebel verbunden, an dem auch das Gewicht angreift. Die Bewegung des Hebels kann auf einer bewegten Fläche aufgezeichnet werden. Wir erhalten eine Verkürzungszuckung. Der Muskel kann aber auch auf einer Unterlage liegen und der Schreibhebel wird senkrecht zu der Längsachse des Muskels an ihn angelegt. Auf diese Weise können wir eine Verdickungszuckung aufschreiben. Der Schreibhebel gibt die Bewegung vergrößert wieder. Die Vergrößerung ist abhängig von der Länge des Hebels und von der Lage des Angriffspunktes des Muskels an den Schreibhebel (Fig. 6).

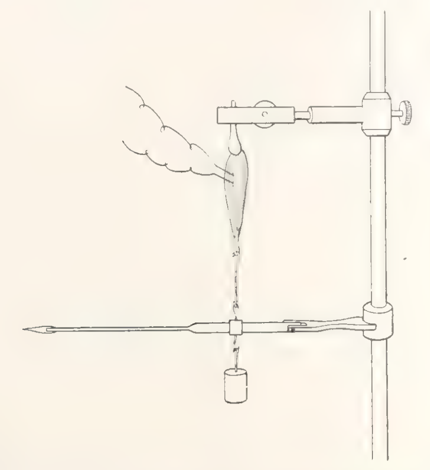


Fig. 6. Vorrichtung zur Aufzeichnung einer Muskelzuckung.

Die registrierende Fläche ist entweder eine Glasplatte, welche berußt oder mit berußtem Papier überzogen ist. Es kann auch weißes Papier angewendet werden, auf das der Schreibhebel mit einer Tintenfeder schreibt; eine solche Registrierung findet auch heute noch bei vielen selbstregistrierenden Instrumenten z. B. Barometern Anwendung. Doch eignet sich diese Methode nur zur Aufzeichnung langsamer Bewegungen. Bei schneller Bewegung tritt infolge des großen Trägheitsmomentes des Hebels eine Hebelschleuderung und damit eine Verzerrung der Kurven ein. In neuerer Zeit wird vielfach der Schatten des Schreibhebels auf einer vorbeigleitenden photographischen Platte registriert.

Statt der an der Schreibhebelspitze vorbeigleitenden Platte wird häufig ein rotierender Zylinder verwendet, der mit berußtem Papier oder mit einem lichtempfindlichen Film überzogen ist.

Während wir bei Verwendung der langsam rotierenden Trommeln der Kymographien, nur Aufschluß über die Höhe der Muskelzuckung und die Veränderungen der Höhe derselben erhalten, zeigen uns die schnell rotierenden Trommeln der Myographien den zeitlichen Verlauf der Verkürzung. Die Zeit kann mit einer Stimmgabel direkt auf die Trommel verzeichnet werden (Fig. 7 und 8).

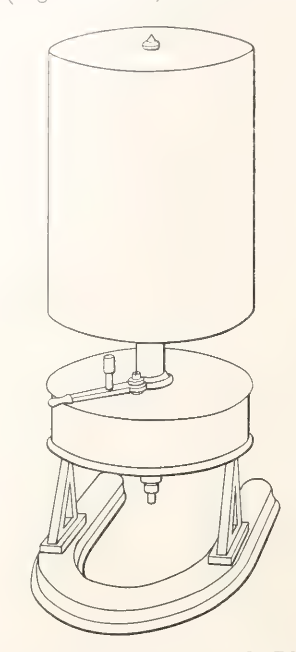


Fig. 7. Myographion nach Blix.

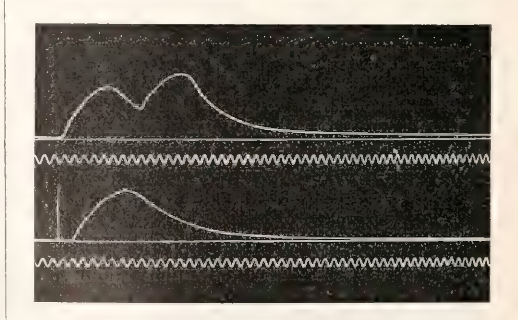


Fig. 8. Einfache und summierte Muskelzuckungen. Bei der unteren Kurve ist der Reizmoment aufgezeichnet. Die Zeit ist mit einer Stimmgabel von 100 Schwingungen in der Sekunde aufgezeichnet.

Um der Hebelschleuderung zu entgehen, verwendet man nach Grützner eine Spiralfeder, die man so an den Schreibhebel angreifen läßt, daß ihr Moment bei Abhebung des Schreibhebels um so vieles abnimmt als der Hebel sich aus seiner Ruhelage entfernt. Die Spannung des Muskels ist während der Zuckung immer gleich; wir nennen eine

solche Zuckung isotonisch. Die Einrichtung kann aber auch so getroffen werden, daß sich der Muskel bei der Kontraktion nicht wesentlich verkürzen kann, daß aber die geringe Verkürzung mit starker Vergrößerung registriert wird. Der Muskel behält bei dieser Art der Anordnung während der Zuckung seine anfängliche Länge fast vollkommen bei; eine solche Zuckung wird als isometrische bezeichnet. Die isometrische Zuckung stellt die eigentliche Energiekurve eines Muskels vor. Unsere Skelettmuskeln arbeiten zum Teil mehr unter isotonischen zum Teil mehr unter isometrischen Bedingungen. Die glatte Muskulatur des Uterus z. B. arbeitet während der Wehen vor der Geburt unter isometrischen, während der Austreibung des Kindes unter isotonischen Bedingungen.

Wird eine Muskelzuckung aufgezeichnet, so beobachtet man, daß zwischen dem Reizmoment und dem Beginn der Kontraktion eine Zeit vergeht, die Latenzzeit (Fig. 8 untere Kurve). Je geringer die Reaktionsgeschwindigkeit eines Muskels ist, um so länger dauert das Stadium der latenten Reizung.

Wenn wir den zeitlichen Verlauf einer Muskelzuckung analysieren, so unterscheiden wir einen aufsteigenden Schenkel, den Gipfel und den absteigenden Teil der Zuckungskurve.

Wenn der Muskel bloß mit einem einzelnen Induktionsschlag gereizt wird, so fällt der Beginn der Erschlaffung an der Reizstelle noch in den aufsteigenden Teil der Zuckungskurve. Das kommt daher, daß die Verdickung oder Verkürzung des Muskels an der Reizstelle beginnt und sich wellenförmig über den Muskel fortpflanzt. Schon in dem wellenförmigen Ablauf der Kontraktion liegt die Tatsache, daß der Muskel an einer Stelle die schon vom Maximum der Kontraktionswelle passiert wurde, zum Teil wieder erschlafft sein muß. Auf dieses Verhalten ist die Tatsache zurückzuführen, daß ein Muskel sich auf einen Einzelreiz nie maximal verkürzen kann, darauf beruht, wie **Fröhlich** gezeigt hat, die Erscheinung, daß eine Muskelzuckung doppelt so hoch ausfällt, wenn der Muskel in der Mitte gereizt wird, als wenn die Reizstelle an einem Ende des Muskels gelegen ist. Es ist dieses Verhalten wichtig, weil die Nervenenden um die Mitte eines Muskels gruppiert sind, und der Muskel dadurch unter günstigeren Bedingungen arbeitet.

Der Ablauf der Kontraktionswelle über einen parallelfaserigen Muskel läßt sich durch Aufzeichnung der Verdickungskurven an zwei oder mehreren Stellen des Muskels studieren. Die Kontraktionswelle pflanzt sich reziprok nach beiden Richtungen in der Längsachse des Muskels fort. Ihre Geschwindigkeit ist wohl der genaueste Ausdruck der Reaktionsgeschwindigkeit des Muskels. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit kann bei verschiedenen Muskeln sehr verschieden sein. Beim Menschenmuskel beträgt sie bis 10 m in der Sekunde, bei einzelnen glatten Muskeln 10 mm und noch weniger. Ebenso wie die Fortpflanzungsgeschwindigkeit bei verschiedenen Muskeln verschieden sein kann, so ist auch die Länge der Kontraktionswelle verschieden. Sie wird aus der Dauer der Kontraktion an einem Muskelquerschnitt und der Fortpflanzungsgeschwindigkeit berechnet.

Muskeln mit geringer Reaktionsgeschwindigkeit zeigen auch ein deutliches Dekrement der Erregungsleitung; die Intensität der Erregungswelle nimmt ab, wenn sie eine längere Muskelstrecke durchläuft.

Wirken zwei Reize hintereinander auf den Muskel ein, so kommt es, wenn die Reizwirkung des ersten Reizes noch nicht abgelaufen ist, wenn der zweite Reiz einwirkt, zu einer Summation der Zuckungen. Es baut sich an der Stelle der ersten Zuckungskurve, an welcher sich die zweite Zuckung entwickelt, eine zweite Zuckungskurve auf. Die Gesamtverkürzung des Muskels wird dadurch stärker. Siehe Fig. 8.

Folgen die Reize einander sehr schnell, so tritt keine Summation ein, der zweite Reiz erscheint entweder nur schwach wirksam oder er ist unwirksam, er fällt in das Refraktärstadium nach dem ersten Reiz. Refraktärstadium nennen wir das Stadium der Unerregbarkeit, das sich an jeden wirksamen Reiz anschließt. Für schwache Reize besteht scheinbar eine Ausnahme, sie können sich noch verstärken, wenn sie in ganz kurzen Intervallen einander folgen, doch beruht dies auf einer Täuschung, zwei schwache Reize summieren sich auch, wenn sie gleichzeitig den Muskel treffen; sie wirken auf den Muskel, wie ein stärkerer Reiz. Die Entwickelung eines Refraktärstadiums läßt sich auch für ganz schwache Reize nachweisen.

Wirken eine Reihe von Reizen auf einen Muskel ein, so sind bei großen Intervallen zwischen den einzelnen Reizen die Zuckungen voneinander getrennt. Wirken die Reize in kürzeren Intervallen, so summieren sich die einzelnen Zuckungen, doch sind die einzelnen Zuckungen noch deutlich erkennbar, wir nennen diese Art der Verkürzung einen unvollkommenen Tetanus. Ein vollkommener maximaler Tetanus tritt erst ein, wenn die Reize einander so schnell folgen, daß eine Erschlaffung des Muskels an der Reizstelle zwischen zwei Reizen nicht mehr eintreten kann. Es ist klar, daß bei Muskeln träger

Reaktion schon eine weit geringere Reizfrequenz genügt, um einen vollkommenen Tetanus hervorzurufen, als dies bei einem flinken Muskel der Fall ist (Fig. 9).

Der tetanischen Verkürzung steht die tonische sehr nahe. Tetanus und Tonus sind nur der Intensität nach voneinander unterschieden. Der Tonus wird

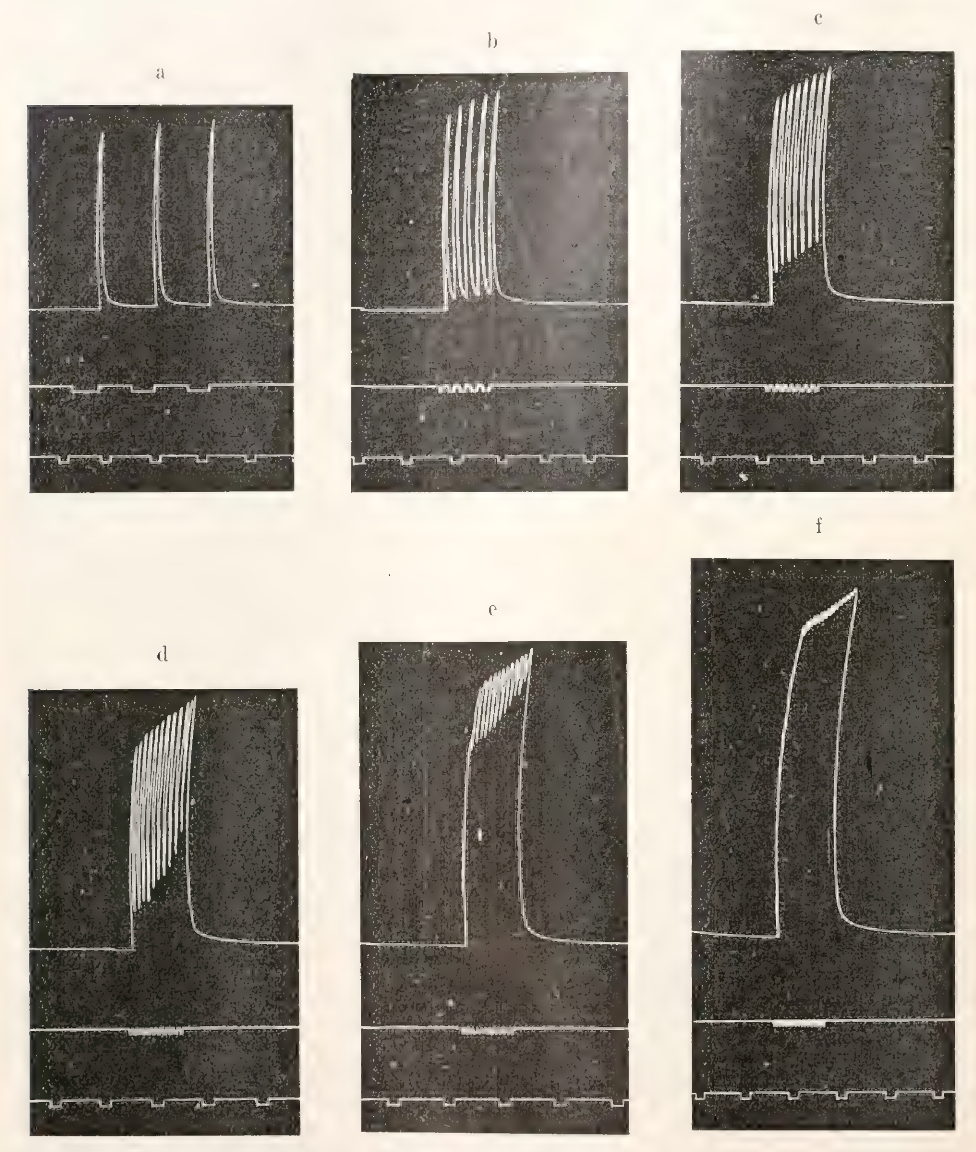


Fig. 9. a, b, c zeigt die Reaktion eines Muskels auf Reize, welche einander verschieden schnell folgen, d, e, f zeigt Formen von unvollkommenen Tetanus bei verschieden schnell aufeinanderfolgenden Reizen. Kurve 9f zeigt einen unvollkommenen Tetanus, dessen Zacken fast miteinander verschmelzen.

Da die Erregungen vom Zentralnervensystem des Menschen in einer Frequenz von 50 bis 100 m-Sek. zum Muskel gelangen, so sind selbst die kürzesten willkürlichen oder reflektorischen Erregungen kurze Tetani.

durch schwache Erregungen aufrecht erhalten, welche dem Muskel vom Zentralnervensystem zugehen. Zur tonischen Reaktion sind die Muskeln geringerer Reaktionsgeschwindigkeit besonders geeignet, weil sie schon schwache und wenig frequente

Reize zu einem vollkommenen Tetanus summieren können. Die Muskeln, deren Funktion es mit sich bringt, daß sie langandauernde Verkürzungen ausführen müssen, weisen durchweg eine geringere Reaktionsgeschwindigkeit auf. v. Uexküll hat solche Muskeln als Sperrmuskeln bezeichnet. Sie sind imstande eine andauernde Verkürzung mit einem geringen Aufwand chemischer Energie auszuführen.

Wenn wir die verschiedenen quergestreiften Muskel betrachten, so können wir zwei Arten unterscheiden, die roten und die weißen. Die roten Muskeln sind träge, die weißen flink. Bei den Vögeln sind die Flugmuskeln weiß, die Standmuskeln rot. In vielen Fällen ist ein Muskel aus beiderlei Arten von Fasern zusammengesetzt und ist dadurch in besonderem Grade imstande, schnelle und tonische Bewegungen auszuführen.

Es vertreten auch heute noch eine Reihe von Autoren den Standpunkt, daß die langandauernden tonischen Verkürzungen glatter Muskeln nicht einer tetanischen Kontraktion, sondern einem Zustand der Ruhe entsprechen. Der Beweis dafür ist keineswegs geglückt. Sicher ist, daß der Tonus vieler glatten Muskeln mit einer Stoffwechselsteigerung einhergeht, wie z. B. F. B. Hoffmann für den Tonus der glatten Chromatophorenmuskeln der Cephalopoden gezeigt hat. Es ist auch sicher, daß je träger die Reaktion eines Muskels ist, eine um so geringere Stoffwechselsteigerung zur Aufrechterhaltung einer andauernden Verkürzung genügt. Diese Steigerung kann unter Umständen so gering sein, daß sie in die Fehlergrenzen der Versuchsmethode fällt und sich nicht nachweisen läßt.

Es wird vielfach hervorgehoben, daß die glatten Muskeln auch in der Ruhe eine wechselnde Länge aufweisen können. An den Chromatophorenmuskeln läßt sich der Zustand Erschlaffung ohne weiteres nachweisen. Wir dürfen nicht vergessen, daß die ausgeschnittenen oder sonst geschädigten glatten Muskeln auf eine Reihe von schwachen Reizen reagieren, auf welche die quergestreiften Muskeln nicht ansprechen. Wir müssen ferner berücksichtigen, daß schon die Belastung auf sie als mechanischer Reiz wirkt.

Auch an den Skelettmuskeln läßt sich, solange sie sich noch mit ihrem Zentralnervensystem in Verbindung stehen, keine Ruhelage feststellen. Das Zentralnervensystem oder die sensiblen Aufnahmestellen reagieren besonders fein auf die schwachen Reize der Außenwelt. Die Muskeln verkürzen sich oder erschlaffen, ohne daß die Veranlassungen zu diesen Bewegungen offenbar werden.

Viele Muskeln sind nicht imstande auf eine schnelle Folge von Reizen oder auf einen konstanten Reiz mit einem Tetanus zu antworten; sie zeigen bei Reizung rhythmische Kontraktionen. Zu diesen Muskeln gehört in erster Linie das Herz. Wenn wir aber genau zusehen, so finden wir die rhythmische Reizbeantwortung mehr oder weniger ausgebildet bei allen Muskeln, umgekehrt kann auch das Herz bei starken Reizen Andeutung einer tetanischen Verkürzung zeigen.

Die Eigenschaft, Reize mit rhythmischen Kontraktionen zu beantworten, ist um so mehr ausgebildet, je langsamer die Reaktionsgeschwindigkeit des gereizten Muskels ist und je länger der Reiz dauert. Hier sind die rhythmischen Kontraktionen anzuführen, welche bei Schließung und Oeffnung des konstanten Stromes oder bei faradischer Reizung mit hoher Reizfrequenz oder bei chemischer und mechanischer Reizung auftreten. Die verfeinerte elektrophysiologische Methodik hat gezeigt, daß den rhythmischen Erregungsvorgängen eine viel weitere Verbreitung zukommt, als man anfänglich dachte. Es soll bei Besprechung der Elektrizitätsproduktion auf das Problem des Rhythmus näher eingegangen werden.

γ) Die Veränderung der Muskelzuckung durch Erregung und Lähmung des Muskels. Einfluß der Ermüdung auf die Muskelzuckung. Relative und absolute Ermüdung und ihre Beziehung zum Refraktärstadium. Die einleitenden Zuckungen, das Treppenphänomen. Die Ermüdungskontraktur. Die paradoxe Tonussteigerung und das Flimmern. Einfluß der Temperatur, der Kohlensäure und der Entartung auf die Muskelzuckung. Die verschiedene Beeinflussung der beiden Phasen des Erregungsvorganges.

Wir können die Erregungsvorgänge im Muskel beschleunigen oder verlangsamen. Der Muskel wird sich im großen ganzen im ersten Falle wie ein Muskel mit größerer, im letzteren Falle wie ein Muskel mit geringerer Reaktionsgeschwindigkeit verhalten.

Wenn wir einen Muskel längere Zeit reizen, dann zeigt er Anzeichen von Ermüdung. Wir müssen dabei eine relative und eine absolute Ermüdung unterscheiden. Wird ein Muskel mit schwachen Reizen erregt, so tritt für dieselben viel rascher Ermüdung, d. h. Unerregbarkeit des Muskels ein, als wenn wir ihn mit starken Reizen erregen. Wir bezeichnen diese Ermüdung als eine relative, sie besteht nur in Relation zu einer bestimmten Reizstärke. Wird dagegen ein Muskel so lange gereizt,

bis er überhaupt, selbst auf die stärksten Reize, nicht mehr reagiert, so sprechen wir von einer absoluten Ermüdung. Der relativen und der absoluten Ermüdung entsprechen ein relatives und ein absolutes Refraktärstadium. Refraktärstadium und Ermüdung weisen nur quantitative Unterschiede auf. Ermüdung kommt nach Verworn zustande durch Erschöpfung der zerfallsfähigen Substanz an der Reizstelle und durch Anhäufung von Dissimilationsprodukten. Auch durch den Einzelreiz wird zerfallsfähige Substanz verbraucht, es entstehen gleichfalls lähmende Dissimilationsprodukte, doch können der Mangel an Ersatzmaterial und die Dissimilationsprodukte rascher beseitigt werden, als wenn durch längere Reizung ein stärkerer Mangel an Ersatzmaterial und eine stärkere Anhäufung von Dissimilationsprodukten eingetreten ist.

Wird ein Muskel rhythmisch gereizt, so daß der Muskel vollkommen getrennte Einzelzuckungen ausführt, so sehen wir in vielen Fällen die Zuckungen an Höhe abnehmen, ihre Dauer wird kürzer, ihre Fußpunkte können unter die anfängliche Abszisse absinken. Diese Zuckungen werden als einleitende Zuckungen bezeichnet, sie treten besonders deutlich an den glatten Muskeln hervor, bei welchen sich diese Veränderungen auf eine große Anzahl von Zuckungen erstrecken können.

Die einleitenden Zuckungen beruhen auf der Eigenschaft der Muskeln, insbesondere der glatten Muskeln, einen Reiz nicht mit einer Einzelzuckung, sondern einer tetanischen Verkürzung zu beantworten. Da diese Fähigkeit unter der Ermüdung leidet, so werden die Tetani immer niedriger und kürzer und ihre Fußpunkte sinken immer mehr unter die Abzisse. Die einleitenden Zuckungen zeigen in ihrer Entstehung eine enge Beziehung zu den Hemmungsvorgängen, die insbesondere im Zentralnervensystem eine große Bedeutung besitzen.

Wird die rhythmische Reizung längere Zeit fortgesetzt, dann nimmt die Höhe und die Dauer der einzelnen Zuckungen zu, ihre Fußpunkte heben sich von der anfänglichen Abszisse ab. Diese allmähliche Zunahme der Zuckungshöhe wird als Treppenphänomen bezeichnet. Es tritt bei den quergestreiften Muskeln schon nach wenigen Reizen hervor, bei den glatten Muskeln erst nach mehreren Hundert Reizen. Das Treppenphänomen hängt, wie Fröhlich gezeigt hat, mit einer scheinbaren Erregbarkeitssteigerung zusammen, wie sie im Beginn lähmender Beeinflussung des Muskels häufig zur Beobachtung kommt. Durch die Ermüdung wird der Ablauf der Zuckung, insbesonders die Erschlaffung verlangsamt. Dadurch ist die Erschlaffung an der Reizstelle in dem Moment, in welchem die Erregungswelle am Ende des Muskels anlangt, noch nicht so weit fortgeschritten, wie am unermüdeten Muskel und dadurch ist die Gesamtverkürzung eine stärkere, während gleichzeitig die Intensität der Erregungsvorgänge eine Abnahme aufweist.

Geht die Ermüdung noch weiter, dann wird die Erschlaffung noch weiter verlangsamt, so daß es mehrere Sekunden, selbst Minuten dauern kann, bis die Kurve zur Abszisse zurückkehrt. Wir bezeichnen diesen Verkürzungsrückstand als Kontraktur. Sie steht in naher Beziehung zum Kontraktionsvorgang und zu den Starrezuständen; sie nimmt gewissermaßen eine Mittelstellung zwischen beiden ein, ebenso wie der ideomuskuläre Wulst, welchen die Muskeln bei starker mechanischer Reizung einer Stelle aufweisen, z. B. wenn man mit einem scharfkantigen Lineal senkrecht zur Faserrichtung auf den Muskel einen Schlag führt.

Die Ermüdung hat auch auf die Summationserscheinungen einen Einfluß. Eine Reizfrequenz, welche am unermüdeten Muskel einen unvollkommenen Tetanus hervorrief, veranlaßt am ermüdeten Muskel einen vollkommenen Tetanus. Ist die Ermüdung weiter vorgeschritten, dann leidet die Summationsfähigkeit, weil jetzt die Restitutionsprozesse nach jedem Reiz verlangsamt sind und der folgende nur eine geringe Verkürzung hervorzurufen imstande ist. Auf der Verlangsamung der Reaktionsgeschwindigkeit beruht auch die paradoxe Tonussteigerung, welche die quergestreiften besonders aber die glatten Muskeln im Beginn der Ermüdung oder anderer lähmender Beeinflussungen aufweisen. Die paradoxe Tonussteigerung, oder das Flimmern, das die quergestreiften Muskeln z. B. bei der Entartung aufweisen, beruhen zum Teil auch darauf, daß die nunmehr langsamer reagierende Muskelsubstanz auf eine Reihe von Reizen langsamen Verlaufes besser anspricht.

Durch Abkühlung kann die Reaktionsgeschwindigkeit der Muskeln wesentlich verlangsamt werden. Es ist jedoch wichtig, daß die Phase des durch den Reiz gesteigerten Zerfalles, als deren Ausdruck wir die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Erregung ansehen können, durch die Abkühlung weniger verlangsamt wird, als die Restitutionsvorgänge, welche der Hauptsache nach in der Verlangsamung der Erschlaffung zum Ausdruck kommt. Bei einer Temperaturerniedrigung von 19° auf 2° C beträgt die Dehnung des zeitlichen Verlaufes einer Zuckung des Schneidermuskels vom Frosch das 5fache des anfänglichen Wertes, die

Fortpflanzungsgeschwindigkeit ist nur auf das Doppelte gestiegen (Fröhlich).

Diese Tatsache ist von Bedeutung für das Verständnis aller scheinbaren Erregbarkeitssteigerungen, welche viele Muskeln im Beginn lähmender Beeinflussungen zeigen; sie ist aber auch von Bedeutung, weil wir hier eine allgemeine Eigenschaft lebendiger Substanzen vor uns haben. Lähmende Einwirkungen verlangsamen die Restitutionsprozesse nach einem Reiz mehr, als die durch ihn hervorgerufenen Dissimilationsprozesse.

c) Produktion elektrischer Energie. *α*) Der Ruhestrom. Die Präexistenztheorie und Alterationstheorie. Der Aktionsstrom. Der Entdecker der elektrischen Erscheinungen am Muskel ist Galvani. Nach Galvani sind es vorzugsweise die Untersuchungen von Mateucci, Du Bois Reymonds, Hermann und Bernstein gewesen, welche die Frage der Elektrizitätsproduktion des Muskels behandelt und die dazu notwendige Methode geschaffen haben. Heute ist das Interesse an den elektrischen Vorgängen in der lebenden Substanz wieder neu belebt. Dies liegt an der wesentlichen Vervollkommnung der Methodik durch die Konstruktion des Saitengalvanometers, welche wir Einthoven verdanken. Bisher haben Multiplikator, Spiegelgalvanometer und Kapillarelektrometer bei der Untersuchung der tierischen Elektrizität die Hauptrolle gespielt, Apparate, welche infolge der Trägheit ihrer Reaktion die schnellablaufenden elektrischen Vorgänge nur mangelhaft wiedergeben und es notwendig machen, den Verlauf der elektrischen Schwankungen erst aus den Kurven zu berechnen. Das Saitengalvanometer reagiert dagegen so schnell, seine Saite stellt sich so aperiodisch ein, daß in vielen Fällen eine Reduktion der Kurven nicht notwendig ist.

Multiplikator und das Spiegelgalvanometer beruhen auf dem Prinzip der Ablenkung der Magnetnadel durch einen elektrischen Strom, das Prinzip des Kapillarelektrometers beruht auf der Polarisation an der Trennungsfläche von Quecksilber und verdünnter Schwefelsäure durch einen Strom und der damit einhergehenden Veränderung der Oberflächenspannung. Das Saitengalvanometer, dessen wichtigste Teile in Figur 10 wiedergegeben sind, beruht auf dem Prinzip der Ablenkung eines Leiters in einem starken magnetischen Feld, wenn durch den Leiter ein Strom fließt. Als Leiter dient ein zwischen den beiden Polen ausgespannter Quarzfaden, der durch Versilberung leitend gemacht ist, oder ein Platinfaden von hohem Widerstand.

Zur Ableitung der Ströme des Muskels dienen unpolarisierbare Elektroden. Die metallischen, polarisierbaren Elektroden eignen sich wohl für eine kurzdauernde Reizung, nicht aber zur Ableitung der elektrischen Ströme. Die unpolarisierbaren Elektroden bestehen aus einem Glasröhrchen, welches an einem Ende mit einem Tonpfropfen verstopft ist. Der Ton muß mit physiologischer Kochsalzlösung geknetet sein. Das Röhrchen ist mit gesättigter Zinksulfatlösung getränkt, in welcher ein Zinkstab eintaucht. Die Elektrode kann nun mit

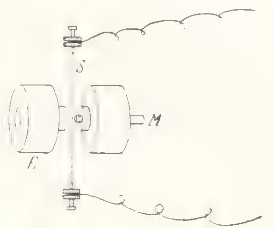


Fig. 10. Schematische Darstellung der Teile eines Saitengalvanometers. S = Saite, E = Elektromagnet, M = Mikroskoptubus.

dem Tonpfropf an den Muskel angelegt werden oder es wird ein mit physiologischer Kochsalzlösung getränkter Pinsel in den Ton hineingesteckt. Figur 11 zeigt solche unpolarisierbare Elektroden.

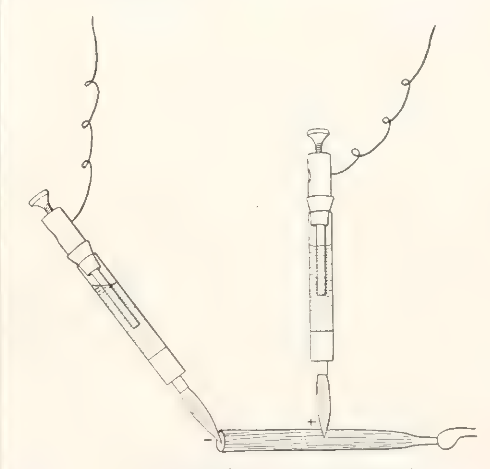


Fig. 11. Unpolarisierbare Pinselelektroden am Längs- und Querschnitt eines Muskels anliegend.

Wird das Seitengalvanometer durch zwei unpolarisierbare Elektroden mit dem Muskel leitend verbunden, so erfolgt in der Regel ein schwacher Ausschlag, der durch den sogenannten Ruhestrom des Muskels veranlaßt ist. Dieser Strom wird jedoch um vieles stärker, wenn wir den Muskel an einer Stelle verletzen oder durchschneiden und die eine Elektrode an den Querschnitt des Muskels anlegen. Dieser Strom wird auch als Demarkationsstrom bezeichnet, weil sich das tote oder absterbende Gewebe dadurch von dem lebenden unterscheidet.

Es herrschte lange die Anschauung, daß der Ruhestrom auch bei dem vollkommen unverletzten Muskel nachzuweisen sei (Präexistenztheorie), heute erscheint es wohl kaum zweifelhaft, daß ein Ruhestrom nur auftritt, wenn eine normale Stelle des Muskels mit einer geschädigten leitend verbunden ist, d. h., wenn zwei Stellen, welche sich in einem verschiedenen Zustand befinden, miteinander verbunden werden (Alterationstheorie). Die Alterationstheorie ist besonders durch Hermann vertreten worden, der mit Nachdruck darauf hingewiesen hat, daß wirklich unverletzte Muskeln auch stromlos sind, daß bei Anlegung eines künstlichen Querschnittes am Muskel, der Demarkationsstrom eine gewisse Zeit zur Entwickelung braucht, daß ferner der schon bestehende Demarkationsstrom allmählich in der Längsachse der Faser vorrückt, in dem Maße, als vom Querschnitt aus die Absterbeprozesse vorrücken.

Der Strom fließt außerhalb des Muskels vom Längsschnitt zum Querschnitt, oder von allen unverletzten Stellen eines Muskels zu den verletzten. Der Strom fließt, wenn er von zwei unverletzten Stellen des Muskels abgeleitet wird zu derjenigen Ableitungsstelle, welche dem Querschnitt am nächsten liegt.

Diese Gesetzmäßigkeiten lassen sich auch nachweisen, wenn ein Muskel reversibel geschädigt wird. Wird eine Muskelstelle abgekühlt, so wird sie negativ zu allen übrigen Muskelstellen: Wird die Temperaturdifferenz wieder ausgeglichen, so verschwindet die Potentialdifferenz.

Der Ruhestrom des Muskels läßt sich auch mit einem Nervmuskelpräparat nachweisen. Der Strom ist so stark, daß er, wenn der Nerv über Längs- und Querschnitt des Muskels gebrückt wird, den Nerven erregen kann. Das ist die Zuckung ohne Metalle, welche schon Galvani beobachtet hat.

Wird ein Muskel, dessen Ruhestrom zum Galvanometer abgeleitet ist, in Erregung versetzt, so zeigt der Ruhestrom, im Moment der Zuckung ein Zurückgehen. Diese Schwankung wird als negative Schwankung des Ruhestromes oder auch als Aktionsstrom bezeichnet.

Der Aktionsstrom tritt erst auf, wenn die Kontraktionswelle die Ableitungsstelle am Längsschnitt des Muskels erreicht. Die in Erregung befindliche Muskelstelle wird negativ gegenüber allen nicht in Erregung befindlichen Stellen. Wir erhalten einen einphasischen Aktionsstrom. Liegt aber die zweite Ableitungsstelle auch am Längsschnitt, so erhalten wir eine zweiphasische Schwankung (Fig. 12). Zuerst wird die der Reizstelle näherliegende Ableitungstselle negativ im Verhältnis zu der entfernterliegenden. Gelangt die Erregungswelle zu der von der Reizstelle entfernterliegenden Ableitungselektrode, so verhält sich jetzt die erste Ableitungsstelle positiv zur zweiten und wir bekommen die zweite Phase des Aktionsstromes.

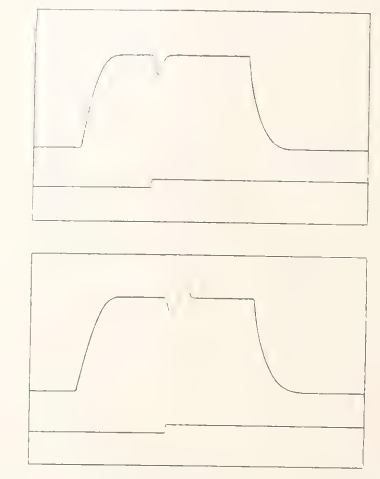


Fig. 12. Zeigt schematisch die Ausschläge der Saite des Saitengalvanometers. Oben Ruhestrom mit einphasischem Aktionsstrom, unten Ruhestrom mit zweiphäsischem Aktionsstrom.

Die Ströme können die elektromotorische Kraft von 0,05 eines Daniell-Elementes erreichen. Nach Galeotti und Di Cristina bis 50 Millivolt. Die Werte sind jedoch von der Art und dem Zustand des untersuchten Muskeln abhängig.

β) Die Beziehung zwischen Zuckung und Elektrizitätsproduktion. Der Aktionsstrom entwickelt sich früher und rascher als die mechanische Veränderung. Die Latenzzeit des Aktionsstromes ist kürzer als die der Zuckung. Es liegt dies offenbar in der geringen Reaktionsgeschwindigkeit, jener Substanzen, deren Veränderung die Verkürzung des Muskels veranlassen. Man darf jedoch aus diesen Beobachtungen keineswegs den Schluß ziehen, daß das Auftreten beider Vorgänge an verschiedene Substanzen gebunden ist. Wir können Verschiedenheit in der Latenzzeit auch beobachten, wenn wir den Aktionsstrom einmal mit einem langsam reagierenden Capillarelektrometer, das anderemal mit dem flinkreagierenden Saitengalvanometer registrieren. Die gleiche Beobachtung tritt uns auch entgegen, wenn wir die Latenzzeiten der Aktionsströme und der Produktion thermischer Energie vergleichen. Die Wärmeentwicklung läßt sich mit unseren Methoden erst einige Zeit nach der Reizung nachweisen. Wir müssen an-

nehmen, daß die Produktion mechanischer, elektrischer und thermischer Energie enge miteinander verknüpft sind, daß sie nur verschiedene Seiten eines und desselben Vorganges sind.

Für die enge Beziehung zwischen Kontraktion und Aktionsstrom liegen eine Reihe von Beweisen vor. Die Aktionsstromwelle pflanzt sich über den Muskel mit der gleichen Geschwindigkeit fort wie die Kontraktionswelle. Wird ein Muskel abgekühlt oder ermüdet, wird seine Kontraktionsgeschwindigkeit durch irgendeine Beeinflussung verlangsamt, dann verlaufen auch die Aktionsströme langsamer. Kontrahiert sich ein Muskel an sich schon träge, so verläuft auch sein Aktionsstrom mit geringerer Geschwindigkeit.

Besonderes Interesse erwecken die Versuche über das Refraktärstadium am Muskel. Es wurde schon bei Besprechung der Zuckungssummation auf dasselbe hingewiesen, die Untersuchung der elektrischen Vorgänge am Muskel hat jedoch ein tieferes Eindringen in diese Frage gestattet. Wirken zwei starke Einzelreize in kurzem Intervall auf den Muskel ein, so rufen sie zwei Aktionsströme hervor, die vollkommen getrennt voneinander sein können. Da die Zuckungen viel länger dauern als die Aktionsströme, erhalten wir unter gleichen Bedingungen schon summierte Zuckungen.

Rücken die Reize immer näher aneinander, so können wir, wie Samojloff und Keith Lucas gezeigt haben, drei Veränderungen an dem zweiten Aktionsstrom wahrnehmen (Fig. 13).

Der zweite Aktionsstrom wird um so kleiner je kürzer das Intervall zwischen den beiden Reizen wird, schließlich wird der zweite Reiz vollkommen unwirksam. Dieses Verhalten ist leicht zu verstehen. Je schneller der zweite Reiz dem ersten folgt, um so weniger Zeit hat der Muskel zur Restitution gefunden, um so geringer muß die durch den zweiten Reiz ausgelöste Erregung sein.

Die zweite Erscheinung ist, daß der durch den zweiten Reiz ausgelöste Aktionsstrom eine um so längere Latenzzeit hat, je schneller der zweite Reiz dem ersten gefolgt ist. Dieses Verhalten wird verständlich, wenn wir die Beziehung zwischen Ermüdung und Refraktärstadium in Betracht ziehen. Eine Ermüdung tritt ein, wenn Reize einander so schnell folgen, daß die Restitution von den vorhergehenden Reizen nicht vollkommen erfolgen kann. Je mehr die Restitution im Rückstand ist, um so stärker ist der Muskel ermüdet, um so mehr treten alle Erscheinungen hervor, welche die Ermüdung charakterisieren. Das sind: Verlangsamung der Erregungsleitung, Herabsetzung der Erregbarkeit, Verlangsamung der Restitution, Verlängerung der Latenzzeit usf. Prinzipiell die gleichen Veränderungen müssen auftreten, wenn der zweite Reiz den Muskel von dem ersten Reiz nicht vollkommen erholt vorfindet. Je schneller der zweite Reiz dem ersten folgt, um so mehr müssen alle die mit ihrer Ermüdung zusammenhängenden Symptome hervortreten, um so länger muß also auch die Latenzzeit des zweiten Reizes sein.

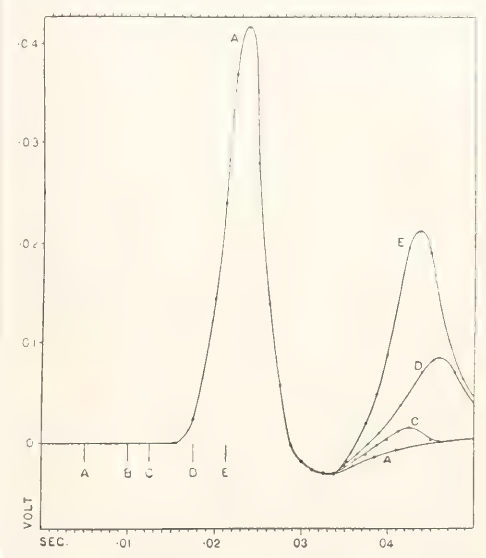


Fig. 13. Aktionsströme des Muskels bei Doppelreizung. Nach Keith Lucas. A, B, C, D und E geben die Reizmomente und die dazu gehörigen Aktionsströme wieder.

Die dritte Erscheinung endlich kommt darin zum Ausdruck, daß die Aktionsstromkurven, welche durch den zweiten Reiz hervorgerufen werden, ungefähr zur gleichen Zeit sich abzuheben beginnen. Dieses Verhalten wird durch den zeitlichen Verlauf der Restitution nach einem Reiz, wie er z. B. für den Skelettmuskel von F. B. Hofmann festgestellt worden ist, verständlich. Die Restitution nach einem Reiz verläuft erst schnell dann langsamer, sie weist, wie neuere Untersuchungen auch für andere Formen lebendiger Substanz gezeigt haben, einen annähernd logarithmischen Verlauf auf. Wenn also das Reizintervall zwischen zwei Reizen gleichmäßig kleiner wird, so wird die Latenzzeit erst allmählich und dann rascher an Dauer zunehmen und dadurch erscheinen die Abhebungspunkte der zweiten Aktionsströme zusammengedrängt. Wir müßten allerdings fordern, und Samojloff hat es auch nachgewiesen, daß die Abhebung der zweiten Kurve nicht in einem Punkt erfolgt, wie aus den Unter-

suchungen von Keith Lucas hervorzugehen schien.

Die Beobachtungen von Keith Lucas sind aber deswegen von Bedeutung, weil sie uns die Reaktion des Herzmuskels auf zwei Reize verständlich macht. Am Herzen ist das Refraktärstadium besonders ausgebildet. Wirkt ein Reiz während der Systole auf das Herz ein, so ist er unwirksam. Wird das Intervall zwischen dem Beginn der Systole und dem zweiten Reiz immer größer genommen, so wird, wie schon Marey gezeigt hat, der zweite Reiz wirksam; er löst eine Extrasystole aus, welche um so kleiner ist, je kürzer das Intervall war, genau wie in den Kurven von Keith Lucas. Aber auch die Latenzzeit der Extrasystole ist länger je früher der Extrareiz dem Beginn der Systole folgt und die Abhebung aller Extrasystolen erfolgt, ungefähr an derselben Stelle der Systole.

Hier liegen allgemeine Gesetzmäßigkeiten zugrunde, welche nicht nur für alle Muskeln, sondern für alle Formen lebendiger Substanz Geltung haben.

γ) Rhythmische Aktionströme. Bei Registrierung der Aktionsströme kann man sehr oft die Beobachtung machen, daß der Muskel einen Reiz nicht mit einem einzelnen Aktionsstrom sondern mit einer Folge von Aktionsströmen beantwortet. Diese rhythmische Reizbeantwortung wird vielfach als Muskelrhythmus bezeichnet (Fig. 14).

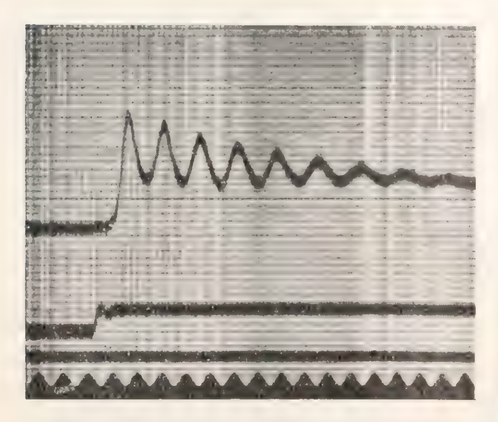


Fig. 14. Rhythmische Aktionsstörung bei Reizung des Schildkrötenmuskels mit dem konstanten Strom. Nach Dittler und Oinuma.

Rhythmen sind besonders leicht an Muskeln mit geringer Reaktionsgeschwindigkeit hervorzurufen und nachzuweisen. Sie treten besser bei längerdauernder Reizung hervor. Der konstante Strom, der mechanische und chemische Reiz veranlassen besonders leicht Muskelrhythmen. Die rhythmischen Kontraktionen, welche wir bei Reizung mit dem konstanten Strome beobachten, stellen jedoch einen Rhythmus II. Ordnung vor. Jeder einzelnen der Kontraktionen liegt eine Reihe von Erregungswellen des Rhythmus I. Ordnung zugrunde. Der Muskel ist zu träge, um auf diese einzelnen Erregungswellen des Rhythmus I. Ordnung mit Einzelkontraktionen zu antworten.

Es ist mehr als wahrscheinlich, daß die Rhythmen I. Ordnung mit der Polarisierbarkeit des Muskels zusammenhängen. Polarisation ist nach Nernst ein wichtiger Faktor beim Zustandekommen der Erregung. F. Krüger hat im Nernstschen Laboratorium besonders auf die rhythmischen Entladungen polarisierter Zellen hingewiesen, die in vieler Beziehung Uebereinstimmung mit den Muskelrhythmen aufweisen. Die Rhythmen treten an den Polarisationszellen um so deutlicher hervor, je langsamer die Diffusionsvorgänge ablaufen. Die Diffusion spielt auch in der lebendigen Substanz eine große Rolle. Ihre Geschwindigkeit wird offenbar durch die gleichen Faktoren bestimmt, welche die Reaktionsgeschwindigkeit der Lebensvorgänge beherrschen. Wir lernen hier die Beziehung zwischen Reaktionsgeschwindigkeit des Muskels und dem Hervortreten der rhythmischen Reizbeantwortung verstehen.

Die Rhythmen II. Ordnung entstehen durch Interferenz mehrerer Reizungen. Ueber das Zustandekommen dieser Interferenz könnten wir jetzt allerdings nur Hypothesen äußern.

δ) Die Theorie der Reizwirkung des elektrischen Stromes und die Theorie der galvanischen Erscheinungen am Muskel. Die im vorhergehenden Abschnitt geäußerten Vorstellungen von dem Zustandekommen der Muskelrhythmen stehen in engem Zusammenhang mit der Theorie der Wirkung des elektrischen Reizes und der Theorie der galvanischen Erscheinungen am Muskel.

Die Untersuchungen von Nernst und seinen Schülern haben zum erstenmal die Möglichkeit einer mathematischen Formulierung eines Reizgesetzes gezeigt. Nernst ging von der Annahme aus, daß die Zellen des Organismus in der Weise polarisierbar sind, daß an den für Salz undurchlässigen Membranen Konzentrationsänderungen auftreten. Diese sollen als Reiz wirken. Es kann nun kein Zweifel sein, daß die Elektrizitätsproduktion des Muskels dadurch zustande kommt, daß durch den Stoffwechsel, besonders aber durch den Salzwechsel an den für Salz undurchlässigen Membranen Konzentrationsänderungen entstehen, welche in dem Auftreten einer Potentialdifferenz zum Ausdruck kommen. Es wäre dann nur

eine Funktion der Diffusionskapacität, ob die Aktionsströme rhythmische sind oder nicht.

d) Die Produktion thermischer Energie. Die Wärmeproduktion in der Ruhe und bei der Tätigkeit. Die Beziehung zwischen Kontraktion und Wärmeproduktion. Die Beeinflussung der Wärmeproduktion durch Ermüdung und Temperaturänderung. Die Wärmeproduktion bei der Totenstarre.

Bei der Muskeltätigkeit entsteht Wärme; ein großer Teil der dem Muskel zugeführten chemischen Energie wird in Wärme verwandelt.

Die Wärmeproduktion des tätigen Muskels war schon lange aus der Temperatursteigerung erschlossen worden, welche die Körper arbeitender Tiere und Menschen aufweisen. Heute wissen wir, daß der Hauptteil der Wärme, welche zur Erhaltung der Körpertemperatur der Warmblüter notwendig ist, von den Muskeln produziert wird.

Der erste experimentelle Nachweis der Wärmeproduktion auch im ausgeschnittenen Muskel wurde von Helmholtz erbracht. Zum Nachweis genügt allerdings nicht die Messung der Muskeltemperatur mit dem Thermometer. Die thermoelektrische Methode der Temperaturmessung ist viel empfindlicher. Es werden Thermoelemente verwendet, die in der Regel aus Wismut und Antimon hergestellt sind und in Form von Thermonadeln in die Muskelsubstanz eingestochen werden. Die andere Lötstelle des Elementes wird unter gleichmäßiger Temperatur gehalten. Die durch die Temperatursteigerung an der einen Lötstelle entstehende Potentialdifferenz wird mit Hilfe eines Galvanometers gemessen. Je nach der Zahl und Größe der Thermoelemente und der Empfindlichkeit des verwendeten Galvanometers kann die Empfindlichkeit dieser Methode außerordentlich gesteigert werden. Es können dann selbst Bruchteile von $^1/_{10\,000}{}^0$ C noch gemessen werden. Mit der Empfindlichkeit der Methode nimmt natürlich die Größe der möglichen Fehler zu. Im Blixschen Thermogalvanometer sind Thermoelement und Galvanometer in praktischer Weise zu einem Apparat vereint. Er gestattet ohne weiteres die Grundtatsachen der Wärmeproduktion des Muskels zu demonstrieren.

Da auch im ruhenden Muskel Stoffwechselvorgänge ablaufen und chemische Energie verbraucht wird, so muß auch während der Muskelruhe Wärme produziert werden. Es waren jedoch viele mühsame Untersuchungen und eine wesentliche Verbesserung der Methodik notwendig, bis Blix dieser Nachweis gelungen ist.

Wird ein Muskel durch Reiz zu einer Verkürzung veranlaßt, so steigt seine Wärmeproduktion. Reize, welche keine Verkürzung des Muskels veranlassen, rufen keine nachweisbare Steigerung der Wärmeproduktion hervor.

Wird der Reiz verstärkt, so nimmt mit wachsender Zuckungshöhe die Menge der produzierten Wärme zu. Das gleiche gilt von der Belastung. Mit zunehmender Belastung nimmt die Produktion an mechanischer und thermischer Energie zu, doch läßt sich weder zwischen der Höhe der Zuckung und der Wärmeproduktion, noch zwischen der Produktion mechanischer und thermischer Energie ein strenger Parallelismus feststellen. Methodische Schwierigkeiten sind es, welche es bisher unmöglich gemacht haben, das Gesetz von der Erhaltung der Energie auch für den Muskel exakt zu beweisen. Wird ein gereizter Muskel an der Verkürzung verhindert, so kann er keine in Betracht kommende mechanische Energie produzieren, es entsteht mehr Wärme.

Wird ein Muskel zu einer summierten Doppelzuckung veranlaßt, so produziert er mehr Wärme, jedoch nicht doppelt soviel wie bei zwei Einzelzuckungen. Bei der tetanischen Verkürzung tritt dieses Verhältnis noch mehr hervor. Im Tetanus wird am meisten Wärme produziert. Dies kommt auch daher, daß der Muskel im Tetanus keine mechanische Arbeit leistet und mehr Energie im Wärme verwandelt wird.

Unter dem Einfluß der Ermüdung nimmt die Wärmeproduktion ab, doch besteht hier gleichfalls kein strenger Parallelismus zwischen Zuckungshöhe und produzierter Wärme. Das kommt zum Teil daher, daß die Zuckungshöhe des ermüdenden Muskels im Stadium der Treppe größer werden kann, während sein Energiewechsel sicher vermindert ist.

Die Wärmeproduktion ist ferner von der Temperatur abhängig. Je höher sie ist, um so mehr Wärme wird produziert.

Auch bei der Totenstarre wird Wärme produziert. Es ist diese Beobachtung ein wichtiger Anhaltspunkt für die engen Beziehungen, welche zwischen Kontraktion und der Totenstarre bestehen.

e) Verbrauch chemischer Energie. Gas- und Stoffwechsel des Muskels. Die Quelle der Muskelkraft. Die Energieproduktion wird durch chemische Energie gedeckt, welche dem Muskel entweder in Form von aufgespeichertem Reservematerial direkt zur Verfügung steht oder in reicher Menge durch den Blutstrom zugeführt wird.

Die Stoffe, welche im Energiewechsel

des Muskels Verwendung finden, sind dieselben, welche wir bei Besprechung der chemischen Zusammensetzung des Muskels kennen gelernt haben. Es sind Eiweißkörper, Fette und Kohlehydrate. Durch das Blut werden dem Muskel Eiweißkörper, Fette, Glyzerin und Fettsäuren, ferner Traubenzucker zugeführt, welcher entweder sofort verbraucht oder, zu Glykogen aufgebaut, als Reservematerial im Muskel abgelagert wird.

Um die Stoffwechselvorgänge im Muskel zu studieren, kann man seine chemische Zusammensetzung vor und nach einer starken und länger dauernden Aktion untersuchen. Man kann den Gaswechsel des ausgeschnittenen Muskels studieren, oder die Zusammensetzung seines arteriellen und venösen Blutes vergleichen. Man kann schließlich den Gesamtstoffwechsel des ruhenden Körpers mit dem Stoffwechsel des arbeitenden Körpers zum Vergleich bringen.

Der Muskel weist auch in der Ruhe einen Stoffwechsel auf, bei welchem sowohl stickstofffreie als auch stickstoffhaltige Stoffe verbrannt werden. Die Intensität des Stoffwechsels ist auch in der Ruhe eine verhältnismäßig große, da den Muskeln von ihrem Zentralnervensystem andauernd Erregungen zugehen, welche sie in einer mehr oder minder starken tonischen Verkürzung erhalten. Werden die Nerven eines Muskels durchschnitten, so sinkt der Stoffwechsel in der Ruhe bedeutend ab.

Die Verbrennung des organischen Heizmaterials geht mit einem Verbrauch von Sauerstoff und mit einer Produktion von Kohlensäure einher. In der Ruhe wird mehr Sauerstoff aufgenommen als Kohlensäure ausgeschieden wird. Bei andauernder Muskeltätigkeit ist sowohl der Sauerstoffverbrauch als die Kohlensäureproduktion gesteigert, doch wird mehr Kohlensäure abgegeben als Sauerstoff aufgenommen wird. Daraus geht hervor, daß zur Energieproduktion des Muskels auch Spaltungen nicht oxydativer Natur herangezogen werden.

Bei der Tätigkeit des Muskels verwandelt sich in der Ruhe die amphotere Reaktion in eine schwach saure. Es gelingt der Nachweis freier Milchsäure, die sowohl aus dem Stoffwechsel der Eiweißkörper als auch aus dem der Kohlehydrate stammen kann. Die Milchsäure tritt dabei als das Produkt unvollkommener Oxydation auf.

Der Stoffwechsel ist auch während einer tetanischen Verkürzung bedeutend gesteigert; wir haben gehört, daß in diesem Fall keine äußere Arbeit geleistet und ein großer Teil der Energie in Wärme verwandelt wird.

Je größer die Reaktionsgeschwindigkeit ist, um so stärker sind die Stoffwechselvorgänge während einer tetanischen Kontraktion gesteigert. Bei trägen Muskeln geht die tetanische Verkürzung nur mit einer geringen Stoffwechselsteigerung einher. Bei einzelnen Muskeln, die besonders durch ihre träge Reaktion auffallen, wie der Schließmuskel der Muschelschalen, kann die langdauernde tonische Verkürzung ohne nachweisbare Stoffwechselsteigerung einhergehen. Es wurde schon oben darauf hingewiesen, daß wir durch solche Beobachtungen keine Berechtigung erlangen, den Tonus als einen Zustand der Ruhe zu bezeichnen.

Es ist bisher nicht gelungen, tiefer in das Stoffwechselgetriebe des Muskels einzudringen. Wir kennen nur die Nahrungsstoffe, welche dem Muskel zugeführt werden und einzelne Endprodukte des Stoffwechsels. Wir wissen, daß sich im tätigen Muskel weniger wasserlösliche und mehr alkohollösliche Stoffe nachweisen lassen. Wir wissen ferner, daß während der Kontraktion der Wassergehalt des Muskels zunehmen kann.

Vielfach ist die Frage nach der Quelle der Muskelkraft erörtert worden. Pflüger konnte nachweisen, daß Hunde, welche bei fast reiner Eiweißnahrung gehalten werden, vollkommen arbeitsfähig bleiben, während Fick und Wislicenus, Voit und Pettenkofer den Nachweis erbrachten, daß bei gemischter Nahrung die Muskelarbeit ohne wesentliche Steigerung der Stickstoffausscheidung geleistet werden kann.

Bei sehr starker Arbeitsleistung, welche zur Ermüdung führt, erscheint jedoch auch die Stickstoffausscheidung gesteigert.

Nach diesen Feststellungen sind bei gemischter Nahrung und nicht zu starker Anstrengung Kohlehydrate und Fette, jedenfalls stickstofffreie Substanzen die Quellen der Muskelkraft, während bei reiner Eiweißkost die Eiweißkörper die Quelle der Muskelkraft vorstellen.

5. Die Theorie der Kontraktion. Die Theorien, welche sich mit dem Zustandekommen der Muskelkontraktion beschäftigen, lassen sich in zwei Gruppen einteilen. Die eine Theorie sieht in dem Muskel eine thermodynamische Maschine, bei welcher wie bei einer Dampfmaschine die chemische Energie zuerst in Wärme und diese in mechanische Energie umgewandelt wird. Die zweite Gruppe sieht in der Kontraktion einen chemodynamischen Vorgang, bei welchem ein Teil der zugeführten chemischen Energie in Wärme, ein anderer direkt in mechanische Energie umgewandelt wird.

Zu den Vertretern der thermodynamischen Theorie der Muskelkontraktion gehörte in erster Linie Th. W. Engelmann. Engelmann hat durch eine große Reihe von Untersuchungen den Nachweis geführt, daß Kontraktilität, wo und in welcher Form

sie auftreten möge, an die Gegenwart doppeltbrechender, positiv einachsiger Teilchen gebunden ist, deren optische Achse mit der Richtung der Verkürzung übereinstimmt. Engelmann vertrat den Standpunkt, daß dort, wo die kontraktilen Fibrillen aus abwechselnd isotropen und anisotropen Gliedern bestehen, die anisotropen der Sitz der verkürzenden Kräfte sind, denn auch alle faserigen Gewebselemente können, wenn sie positiv doppeltbrechend und merklich quellungsfähig sind, sich unter Verdickung in der Richtung ihrer optischen Achse verkürzen. Auch die Kraft, welche bei der Verkürzung lebloser Fasern durch Quellung oder Erwärmung entwickelt werden kann, sowie der relative Betrag der Verkürzung ist um so größer, je größer die Kraft der Doppelbrechung ist. Die absoluten Werte der Kraft können die höchsten bei den Muskeln beobachteten Werte übertreffen. Bekannt ist folgender Versuch Engelmanns. Eine in Wasser befindliche Darmsaite, welche an einem Ende fixiert, an dem anderen mit einem Schreibhebel verbunden, ist, verkürzt sich durch Quellung, wenn sie durch eine Heizspirale erwärmt wird. Der zeitliche Verlauf dieser Verkürzungen entspricht dem der Muskelkontraktion.

Das Gemeinsame der zweiten Gruppe von Theorien liegt darin, daß sie eine direkte Umwandlung der chemischen Energie in mechanische Energie annehmen. Nach Fick sollen die chemischen Anziehungskräfte im Sinne des Muskelzuges angeordnet mechanisch zur Wirkung kommen, während nach Verworn, Jensen und Bernstein die Stoffwechselvorgänge mit einer Zu- und Abnahme der Oberflächenspannung einhergehen sollen. Verworn weist besonders auf die Kontraktionserscheinungen hin, welche die Protoplasmamassen Einzelliger zeigen. Hier wird die Beteiligung der Oberflächenspannung und ihrer Veränderungen bei dem Zustandekommen der Kontraktions- und Expansionsbewegungen besonders deutlich. Auch dem Sauerstoff kommt nach Verworn ein großer Einfluß auf die Bewegungsvorgänge zu. Verworn schreibt: „Durch den Aufbau und Zerfall der Biogenmoleküle würden die abwechselnden Veränderungen in der Kohäsion des Protoplasmas, die zur Entstehung der Expansions- und Kontraktionsphase führen, vollkommen verständlich werden, mag man nun die Einfügung des Sauerstoffs in das Biogenmolekül selbst als den kohäsionsherabsetzenden und den oxydativen Zerfall des Biogenmoleküls als den kohäsionserhöhenden Faktor annehmen oder mag man die Kohäsionsverminderung erst mit der Oxydation der Zerfallprodukte des Biogenmoleküls und die Kohäsionserhöhung mit der Entstehung dieser Produkte verbunden denken." L. Hermann hat ferner auf die nahen Beziehungen zwischen Kontraktionsvorgang und den Starrezuständen, welche beide mit einer Verkürzung und Verdickung der Muskeln einhergehen, hingewiesen und es wahrscheinlich gemacht, daß bei der Kontraktion Gerinnungsvorgänge enge beteiligt sind.

Wenn wir auch heute noch nicht in der Lage sind, die sichere Entscheidung zu treffen, ob die Muskelkontraktion durch eine direkte Verwandlung chemischer in mechanische Energie zustande kommt, so hat doch diese Theorie die meiste Wahrscheinlichkeit für sich.

Die Kontraktilität ist die bemerkenswerteste Eigenschaft der Muskelsubstanz, mit ihr sind jedoch enge verknüpft Erregbarkeit und Leitfähigkeit. Die Erregung selbst ist ein komplexer Vorgang, welcher nach außen in der Produktion mechanischer, elektrischer und thermischer Energie zum Ausdruck kommt. Der Versuch einer Trennung von Erregbarkeit, Leitfähigkeit und Kontraktilität und die Annahme einer verschiedenen Beeinflußbarkeit dieser Eigenschaften erscheint ebensowenig berechtigt, wie die Annahme, daß die Produktion mechanischer, elektrischer und thermischer Energie an verschiedene Stellen der Muskelsubstanz zu lokalisieren ist.

Literatur: *1. Zusammenfassende Darstellungen. a) Histologie der Muskeln:* **Heidenhain,** *Plasma und Zelle, Jena 1907. — b) Physiologie der Muskeln:* **W. Biedermann,** *Elektrophysiologie, Jena 1895. —* **Hermann,** *Allgemeine Muskelphysik. Hermanns Handbuch der Physiology. —* **O. Nasse,** *Chemie und Stoffwechsel der Muskeln. In Hermanns Handbuch der Physiologie. —* **M. v. Frey,** *Allgemeine Physiologie der quergestreiften Muskeln und* **R. Du Bois-Reymond,** *Allgemeine Physiologie der glatten Muskeln. In Nagels Handbuch der Physiologie. — 2. Arbeiten über spezielle Fragen.* **O. v. Fürth,** *Zur Gewebschemie des Muskels. Ergebnisse der Physiologie I. 1. Abteilung, 1902, S. 110. —* **Th. W. Engelmann,** *Zur Theorie der Kontraktilität I. Kontraktilität und Doppelbrechungsvermögen. Archiv für Anatomie und Physiologie. Physiologische Abteilung, 1907, S. 25. —* **Hürthle,** *Ueber die Struktur der quergestreiften Muskelfasern von Hydrophilus im ruhenden und tätigen Zustand. Pflügers Archiv, Bd. 126, 1909, S. 1. —* **F. B. Hofmann,** *Ueber einen peripheren Tonus der Cephalopodenchromatophoren und ihre Beeinflussung durch Gifte. Pflügers Archiv, Bd. 18, S. 375, 1907. —* **Ernst Weber,** *Der Einfluß psychologischer Vorgänge auf den Körper, insbesondere auf die Blutverteilung, Berlin 1910. —* **E. Mangold,** *Ueber die postmortale Erregbarkeit quergestreifter Warmblütermuskeln. Pflügers Archiv. Bd. 96, S. 498, 1903. —* **Overton,** *Beiträge zur allgemeinen Muskel- und Nervenphysiologie. 1. Mitteilg. Pflügers Archiv. Bd. 92, S. 115, 1902. 2. Mitteilg. Ueber die Unent-*

behrlichkeit von Natrium- (oder Lithium)-Ionen für den Kontraktionsakt. Ebenda Bd. 92, S. 346, 1902, 3. Mitteilg. Studien über die Wirkung der Alkali- und Erdalkalisalze auf Skelettmuskeln und Nerven. Ebenda Bd. 105, S. 176, 1904. — **R. Höber,** *Physikalische Chemie der Zelle. Leipzig 1906.* — **Fr. W. Fröhlich,** *Ueber den Einfluß der Temperatur auf den Muskel. Zeitschrift für allgemeine Physiologie. Bd. 7, S. 461, 1908, Bd. 9, S. 515, 1909.* — **Fr. Reinecke,** *Ueber die Entartungsreaktion und eine Reihe mit ihr verwandter Reaktionen. Zeitschrift für allgemeine Physiologie. Bd. 8, S. 422, 1908.* — **E. Reiss,** *Die elektrische Entartungsreaktion. Klinische und experimentelle Studien über ihre Theorie. Berlin 1911.* — **Max Verworn,** *Allgemeine Physiologie. Ein Grundriß der Lehre vom Leben. V. Auflage. Jena 1909.* — **Derselbe,** *Erregbarkeit. Zeitschrift f. allgemeine Physiologie. Bd. 12, 1911.* — **F. B. Hofmann,** *Gibt es in der Muskulatur der Mollusken periphere kontinuierlich leitende Nervennetze bei Abwesenheit von Ganglienzellen. Pflügers Archiv. Bd. 118, S. 375, 1907.* — **J. N. Langley,** *On the contraction of muscle, chiefly in relation to the presence of „receptive" substances. I. Journal of Physiology. Bd. 36, S. 347, 1907. II. Ebenda. Bd. 37, S. 165, 1908. III. und IV. The reaction of frog's muscle to nicotine after degeneration. Ebenda Bd. 37, S. 285, 1908. The effect of curare and of some other substances on the nicotine response of the sartorius and gastrocnemius muscles of the frog. Ebenda Bd. 39, S. 235, 1909. On degenerative changes in the nerve endings in striated muscles, in the nerve plexus on arteries, and in the nerve fibres of the frog. Ebenda Bd. 38, S. 504, 1909.* — **Fr. W. Fröhlich,** *Die Analyse der an der Krebsschere auftretenden Hemmungen. Zeitschrift für allgemeine Physiologie. Bd. 7, S. 393, 1908.* — **H. H. Meyer** und **Gottlieb,** *Experimentelle Pharmakologie. Wien 1911.* — **Sherrington,** *The integrative action of the nervous system. London 1906.* — **N. Nernst,** *Zur Theorie des elektrischen Reizes. Pflügers Archiv, Bd. 122, S. 288, 1908.* — **Du Bois Reymond,** *Untersuchungen über tierische Elektrizität, Berlin 1848. Gesammelte Abhandlungen zur allgemeinen Nerven- und Muskelphysik. Leipzig 1875.* — **F. B. Hofmann** und **E. Blaas,** *Untersuchungen über die mechanische Reizbarkeit der quergestreiften Skelettmuskeln. Pflügers Archiv, Bd. 125, S. 137, S. 1908.* — **Fr. W. Fröhlich,** *Das Prinzip der scheinbaren Erregbarkeitssteigerung. Zeitschrift für allgemeine Physiologie. Bd. 9, 1909.* — **Keith Lucas,** *The „all or none" contraction of the amphian skeletal muscle fibre. Journal of Physiology. Bd. 38, S. 113, 1909.* — **Fr. W. Fröhlich,** *Ueber die Abhängigkeit der maximalen Zuckungshöhe des ausgeschnittenen Muskels von der Lage der Reizstelle. Zeitschrift für allgemeine Physiologie. Bd. 5, 1905, S. 317.* — **H. Piper,** *Ueber den willkürlichen Muskeltetanus. Pflügers Archiv. Bd. 119, S. 301, 1907.* — **Derselbe,** *Neue Versuche über den willkürlichen Tetanus der quergestreiften Muskeln. Zeitschrift für Biol. Bd. 50, S. 393.* — **Derselbe,** *Weitere Beiträge zur Kenntnis der willkürlichen Muskelkontraktion. Zeitschrift für Biol., Bd. 50, S. 505.* — **Derselbe,** *Zur Kenntnis der tetanischen Muskelkontraktionen. Zeitschrift für Biol., Bd. 52, S. 86.* — **Derselbe,** *Ueber die Rhythmik der Innervationsimpulse bei willkürlichen Muskelkontraktionen und über verschiedene Arten der künstlichen Tetanisierung menschlicher Muskeln. Zeitschrift für Biol., Bd. 53, S. 140.* — **Derselbe,** *Verlauf und Theorie des Elektromyogrammes der Unterarmflexoren. Pflügers Archiv, Bd. 129, 1909.* — **Derselbe,** *Ueber die Aktionsströme der menschlichen Flexoren des Unterarmes bei Zuckungen. Zentralblatt für Physiol. Bd. 23, Nr. 9.* — **Derselbe,** *Ueber die Ermüdung bei willkürlichen Muskelkontraktionen. Archiv für Anat. und Physiol., 1909, S. 491.* — **Derselbe,** *Weitere Untersuchungen über die natürliche Innervierung von Muskelkontraktionen. Der Temperaturkoeffizient der Rhythmik im Muskel und Nerv. Archiv für Anat. u. Physiol., Physiol. Abt., 1910, S. 207.* — **S. Garten,** *Beiträge zur Kenntnis des Erregungsvorgangs im Nerven und Muskel des Warmblüters. Zeitschrift für Biol. Bd. 52.* — **Derselbe,** *Ueber die zeitliche Folge der Aktionsströme im menschlichen Muskel bei willkürlicher Innervation und bei Erregung des Nerven durch den konstanten Strom. Zeitschrift für Biol., Bd. 55, S. 29.* — **Fl. Buchanan,** *The electrical response of muscle to voluntary reflex and artificial stimulation. Quarterly Journal of experimental physiology. Bd. 1, Nr. 3, S. 211, 1908.* — **R. Dittler,** *Ueber die Innervation des Zwerchfelles als Beispiel einer tonischen Innervation. Pflügers Archiv. Bd. 131, S. 581, 1910.* — **Derselbe,** *Weitere Untersuchungen über die Aktionsströme des Nervus phrenicus bei natürlicher Innervation. Pflügers Archiv. Bd. 130, 1909.* — **Derselbe,** *Ueber die Aktionsströme des Nervus phrenicus bei natürlicher Innervation. Pflügers Archiv. Bd. 136, S. 533, 1910.* — **P. Hoffmann,** *Beiträge zur Kenntnis der menschlichen Reflexe mit besonderer Berücksichtigung der elektrischen Erscheinungen. Archiv für Anat. und Physiol., Physiol. Abt., S. 223, 1910.* — **Fr. W. Fröhlich,** *Experimentelle Studien am Nervensystem der Mollusken 12. Summation, scheinbare Bahnung, Tonus, Hemmung und Rhythmus am Nervensystem von Aplysia limacina. Zeitschrift für allgemeine Physiologie. Bd. 11, S. 275, 1910.* — **Derselbe,** *Ueber die rhythmische Natur der Lebensvorgänge. Zeitschrift für allgemeine Physiologie, Bd. 13, 1911.* — **G. Galeotti,** *Ueber die elektromotorischen Kräfte, welche an der Oberfläche tierischer Membranen bei der Berührung mit den verschiedenen Elektrolyten zustande kommen. Zeitschrift für physikalische Chemie. Bd. 49, S. 542, 1904.* — **Galeotti e di Cristina,** *Correnti di demarcacione nei muscoli di rana in diverso modo alterati. Zeitschrift für allgemeine Physiologie. Bd. 10, 1909.* — **Dieselben,** *Ricerche di elettrofisiologia secondo i criteri dell' elettrochemica. Ebenda. Bd. 6, S. 100, 1907.* — **Keith Lucas,** *On the refractory period of muscle and nerve. Journal of Physiology. Bd. 39, S. 231, 1909.* — **F. B. Hofmann,** *Studien über den Tetanus III. Zur Erklärung der scheinbaren Hemmungen am Nervmuskelpräparat. Pflügers Archiv. Bd. 103, S. 307, 1904.* — **Samojloff,** *Ueber die Verspätung des zweiten Aktionsstromes bei Doppelreizungen des quergestreiften Muskels. Pflügers Archiv Bd. 143, S. 453, 1912.* — **F. Krüger,**

Oscillatorische Entladungen polarisierter Zellen. Annalen der Physik. Vierte Folge. Bd. 21, S. 701, 1906. — **R. Reiss,** *Die elektrische Reizung mit Wechselströmen. Pflügers Archiv. Bd. 117, S. 578, 1907.* — **A. V. Hill,** *A new math. treatment of changes of ionic concentration in muscle and nerve. Journ. of Physiology. Bd. 40, S. 190, 1910.* — **P. Lasareff,** *Ionentheorie der Nerven und Muskelreizung. Pflügers Archiv. Bd. 135, S. 196, 1910.* — **Lapique** *und* **Péletin,** *Nouvelles recherches sur un modèle de la polarisation en vue de la théorie physique de l'excitation. Journ. de Physiol. Bd. 12, 1910.* — **Wilke** *und* **Meyerhof,** *Experimentelle Untersuchungen zur Nernstschen Theorie der elektrischen Nervenreizung. Pflügers Archiv. Bd. 137, 1910.* — **Eucken** *und* **Miura,** *Zur Nernstschen Theorie der elektrischen Nervenreizung. Pflügers Archiv. Bd. 140, S. 593, 1911.* — **Keith Lucas,** *An analysis of changes and differences in the excitatory process of nerves and muscles based on the physical theorie of excitation. Journal of Physiology. Bd. 40, S. 225, 1910.* — **O. Frank,** *Thermodynamik des Muskels. Ergebnisse der Physiologie. Bd. 3, S. 348, 1904.*

F. W. Fröhlich.

Muttersubstanz.

Läßt sich eine Reihe von chemischen Verbindungen auf eine gemeinschaftliche Grundverbindung zurückführen, aus der sie durch Substitution (vgl. den Artikel „Substitution") oder dgl. entstanden sind oder entstehen könnten, so wird diese gemeinsame Grundverbindung als Mutter- oder Stammsubstanz bezeichnet; die aus ihr durch Substitution oder dgl. entstehenden Verbindungen heißen „Abkömmlinge" oder „Derivate".

Myriapoda.

I. Die Bezeichnung „Myriapoda". II. Chilopoda: 1. Systematik. 2. Morphologie. 3. Entwickelung. 4. Biologie. 5. Geographie. III. Progoneata: a) Symphyla. b) Pauropoda. c) Diplopoda: 1. Systematik. 2. Morphologie. 3. Entwickelung. 4. Biologie. 5. Geographie.

I. Die Bezeichnung „Myriapoda".

Die Bezeichnung „Myriapoda" umfaßt Tiergruppen, die wir heute nicht mehr als eine natürliche Einheit anerkennen können. Es hätten daher auch statt der Myriapoda die beiden Stichworte Chilopoda und Progoneata aufgeführt werden sollen. Lediglich aus praktischen Erwägungen ist davon Abstand genommen worden. Doch werden im folgenden die beiden genannten Gruppen getrennt behandelt. Auf Gründe für oder wider eine Auflösung der Gliedertiere in mehrere (2 bis 3) Kreise kann nicht eingegangen werden; es mag genügen, hier festzustellen, daß als

Unterkreis Antennata (oder Tracheata s.str.)

die Gliedertiere in Betracht kommen, die 1. nur ein Antennenpaar besitzen; 2. einen vom Rumpfe scharf abgesetzten Kopf und 3. fast immer Tracheensysteme, die durch meist paarig angeordnete Stigmen nach außen münden. Diesen Antennata werden die Hexapoda und Myriapoda subordiniert. Nachdem man erkannt hatte, daß die Chilopoda den Hexapoda wenigstens ebenso nahe stehen, wie den übrigen „Myriapoda", gab man dieser Gruppe nur noch die Bedeutung eines Sammelbegriffes und teilt nunmehr die Antennata ein in die beiden folgenden Stämme:

I. Phylum Opisthogoneata. Die Ausführwege der Geschlechtsdrüsen münden hinten am Abdomen, vor dem Analsegment. Der Körper besitzt niemals ein Kalkskelett. Tracheensysteme meist mit Anastomosen, nie mit Tracheentaschen. Entweder besitzt der Körper nur 3 Beinpaare oder noch mehr und es kommen dann gleichzeitig giftdrüsenbewehrte Kieferfüße vor. Die Entwickelung verläuft nie mit echter Anamorphose und wenn eine Hemianamorphose vorkommt, beginnt sie mit Larven, denen bereits 7 Paar gegliederte Beine zukommen. Hierhin gehören die beiden Klassen der Hexapoda und Chilopoda.

II. Phylum Progoneata. Die Ausführwege der Geschlechtsdrüsen münden vorn am Rumpfe, hinter dem 2. oder 3. Beinpaar. Der Körper besitzt meistens außer dem Chitinskelett auch noch ein solches von Kalk. Tracheensysteme nie durch Anastomosen verbunden, meist in Tracheentaschen einmündend. Körper der Erwachsenen mit wenigstens 9 Beinpaaren, niemals mit Kieferfüßen. Die Entwickelung verläuft meistens mit echter Anamorphose, wenn aber eine Hemianamorphose vorkommt, beginnt sie stets mit Larven, die nur 3 Beinpaare besitzen; zugleich sind solche Formen immer Kugeltiere. Ueber die Unterscheidung der 3 hierhin gehörigen Klassen Symphyla, Pauropoda und Diplopoda vgl. unter III.

Die Chilopoda weichen von den Hexapoda durchgehends ab durch den Besitz von Kieferfüßen, die sich hinter den beiden Maxillenpaaren befinden und immer Giftdrüsen enthalten. Außerdem besitzen die Erwachsenen mindestens 15 Paar Laufbeine, während ein Thorax im Sinne der Insekten nicht abgesetzt ist.

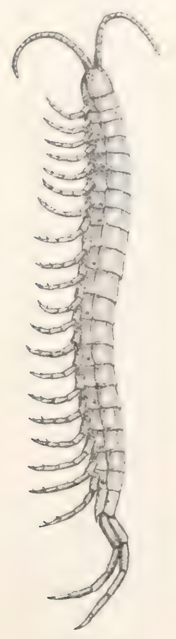


Fig. 1. Rhysida subinermis Meinert. Natürliche Größe. Nach E. Kohlrausch.

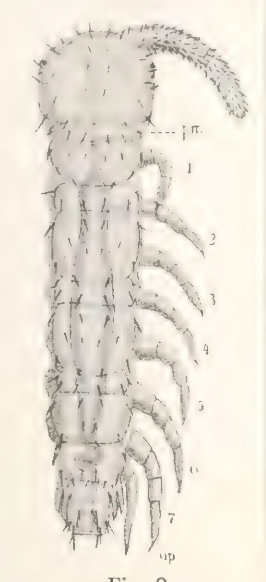


Fig. 2. Monotarsobius curtipes C. Koch. Larve. Stark vergrößert. pm Tergit des Kieferfußsegmentes; up Anlage des 8. Beinpaares. Nach K. W. Verhoeff.

II. Chilopoda (Hundertfüßler).

1. Systematik. Die Hundertfüßler zerfallen in zwei Unterklassen:

I. Notostigmophora Verhoeff 1901. Atmung durch ein Tracheensystem, das mit sieben unpaaren Stomata an den Tergithinterrändern ausmündet, Tracheenrohre in Menge strahlig auseinanderlaufend. Antennen sehr vielgliedrig und sehr lang, bestehend aus einem zweigliedrigen Schaft und einer Geißel, die wenigstens 2 Abschnitte enthält. Kopf mit großen Pseudofacettenaugen. Die vorderen Mundfüße enthalten Sinnesorgane, die mit zahlreichen Stäbchen besetzt sind. Alle Laufbeine sehr lang, besonders der höchst merkwürdige Tarsus, der aus 2 Abschnitten besteht, die vielgliedrig sind und geeignet der Beute wie ein Lasso umgeworfen zu werden. Auf 15 beintragende Segmente kommen nur 8 selbständige große Tergite, während die übrigen teils verwachsen, teils verdeckt sind. Das 15. Beinpaar sehr lang und fühlerartig. Hierhin gehört nur eine Ordnung mit der einzigen Familie Scutigeridae (Spinnenasseln). Bekanntester Vertreter die südeuropäische Scutigera coleoptrata aut.

II. Pleurostigmophora Verhoeff 1901. Atmung durch ein Tracheensystem, das mit paarigen Stigmen im Pleuralgebiet zwischen Hüften und Tergiten ausmündet und aus baumartig verzweigten Rohren besteht. Antennen mit 13 bis über 100 Gliedern, zusammengesetzt aus einem einfachen Schaft und einer niemals in scharfe Abschnitte zerfallenden Geißel. Kopf niemals mit Pseudofacettenaugen, vielmehr ohne Ocellen oder mit einzelnen oder gehäuften. Vordere Mundfüße ohne stäbchenführende Sinnesorgane. Niemals sind alle Beinpaare mit vielgliedrigem Tarsus ausgerüstet und wenn ein solcher vorkommt, fehlen ihm die Abschnitte und sonstige Einrichtungen, so daß er nicht als Lasso verwendbar ist. Auf 15 bis über 100 beintragende Segmente kommen meist ebensoviele Tergite, niemals aber ist ein Teil davon verdeckt gelegen. Das letzte Beinpaar ist niemals fühlerartig gebaut.

In diese Unterklasse gehört die Mehrzahl der Hundertfüßler, nämlich:

1. Ordnung Anamorpha E. Haase. Rumpf immer mit 15 beintragenden Segmenten. Die an die Stigmen sich anschließenden Tracheenbüschel sind durch Anastomosen nicht verbunden. Interkalarsternite fehlen. Die Weibchen besitzen kräftige, sporentragende Gonopoden. Entwickelung mit Hemianamorphose, d. h. auf 4—5 Larvenstufen folgen mehrere epimorphotische Stadien. Unterordnungen: Craterostigmomorpha und Lithobiomorpha Pocock 1902.

2. Ordnung Epimorpha E. Haase. Rumpf mit 21, 23 oder 31—173 beintragenden Segmenten. Die an die Stigmen sich anschließenden Tracheenbüschel sind mehr oder weniger reichlich durch Quer- und Längsanastomosen verbunden. Die Laufbeinsegmente besitzen Interkalarsternite. Sporentragende Gonopoden treten bei den Weibchen nicht auf. Entwickelung mit Epimorphose, d. h. es fehlen Larvenstufen mit einer geringeren Beinpaarzahl immer vollständig. Zur Unterordnung Scolopendromorpha gehören Tiere mit 21 oder 23 Beinpaaren, während den Mitgliedern der anderen Unterordnung Geophilomorpha 31 bis 173 Beinpaare zukommen.

2. Morphologie. Am Kopf der Hundertfüßler unterscheidet man ein Paar Antennen, ein Paar Mandibeln und zwei Paar Maxillen

oder Mundfüße. Diese drei Paar Mundwerkzeuge werden von unten her mehr oder weniger verdeckt durch ein starkes Paar von Kieferfüßen, das nicht nur die Veranlassung zu dem Namen Chilopoda gegeben hat, sondern auch überhaupt das für diese Klasse am meisten charakteristische Gliedmaßenpaar darstellt. Es enthält ausnahmslos Giftdrüsen, die im Endgliede durch einen feinen Porus ausmünden. Der Kopf ist meistens auffallend niedergedrückt, so daß die Oberlippe, vor der ein großes Oralstück sitzt, und die Mundöffnung sich ganz an der Unterfläche befinden. Die Rumpfgliederung ist bei den höchststehenden Formen sehr heteronom (Scutigeridae), während sie bei den niedriger organisierten Geophilomorpha, unter Berücksichtigung einer Reihe von Einschränkungen, fast homonom genannt werden kann. Das Hautskelett ist chitinig und sehr biegsam-elastisch, da es von Kalkablagerungen freibleibt. Die Rumpfsegmente sind mehr oder weniger niedergedrückt, die Beine werden immer durch breite Sternite getrennt, die an ihrer Lokomotion keinen Anteil haben. Diese Sternite sind flach ausgebreitet und niemals die Träger der Atemöffnungen. Die Beinhüften sind nach den Gruppen sehr verschieden gebaut, immer aber stehen sie in inniger Beziehung zu den mit spärlichen bis zahlreichen Skleriten ausgerüsteten und wenigstens teilweise nachgiebig-weichen Pleuralgebieten. Sie sind also nicht in wohlumgrenzte Gelenkpfannen eingesenkt, sondern bestehen selbst meist aus mehreren Teilen und finden in Pleuralteilen eine Stütze. Die am Rumpfhinterende vorragenden Endbeine bieten nach Gestalt, Größe und Funktion eine erhebliche Mannigfaltigkeit. Hinter dem Endbeinsegment folgen ein Genital-, Postgenital- und Analsegment. Während diesem niemals Gliedmaßen zukommen, sind sie an jenen beiden meist vorhanden, aber mehr oder weniger verkümmert und zu Fortpflanzungswerkzeugen umgewandelt; das Postgenitalsegment ist besonders stark rückgebildet und in das Genitalsegment eingeschoben. Die Chilopoden sind reich an Hautdrüsen, die bei den Geophilomorpha besonders zahlreich an Sterniten, Hüften und Pleuriten auftreten. Starke Hüftdrüsen finden sich an den Endbeinen der Scolopendromorpha, bei den Lithobiiden in den Hüften der 4 bis 5 letzten Beinpaare; Drüsen können aber auch an mehreren anderen Beingliedern vorkommen. Segmentale Kopfdrüsen finden sich in 2—4 Paaren und zwar als zwei Paar Schlunddrüsen und zwei Paar maxillare Speicheldrüsen; ein Paar Coxaldrüsen können auch im ersten Rumpfsegment auftreten. An Sinnesorganen sind außer den oft zahlreichen Tastborsten und den antennalen Riechzapfen die nach ihrer Funktion zweifelhaften Maxillarorgane und Antennalorgane der Scutigeriden und die vielleicht als Gehörorgane tätigen Schläfenorgane bei den Gruppen mit 15 Beinpaaren zu nennen. Sehorgane fehlen häufig vollkommen, oft sind einfache Ocellen ausgebildet in nach den Gattungen und Arten verschiedener Zahl, nur den Scutigeriden kommen Pseudofacettenaugen zu, für die die kegelartige Einsenkung des Kristallkörpers in eine zweischichtige Retinula und ein zweischichtiges Rhabdom charakteristisch ist. Der Darmkanal verläuft immer in gerader Richtung von vorn nach hinten, er bildet zuweilen vor dem Beginn des Mitteldarmes eine Darmreuse. Das Blutgefäßsystem besteht aus dem Rückengefäß oder Herzen und einem Bauchmarkgefäß, die im Kieferfußsegment durch Aortenbogen miteinander verbunden werden. Beide Hauptgefäße entsenden Seitenarterien, die weit in die Gliedmaßen hineinreichen. An die Stigmen des Atmungssystems schließt sich häufig ein Stigmenkelch an, niemals aber Tracheen-

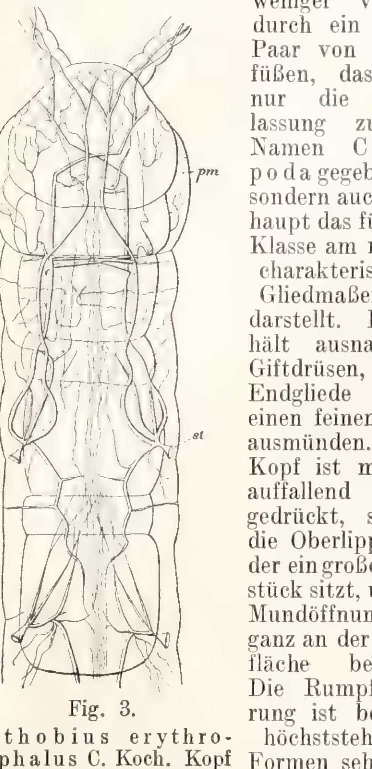


Fig. 3.
Lithobius erythrocephalus C. Koch. Kopf und vordere Rumpfsegmente und Tracheensystem derselben ohne Anastomosen. st Stigma, pm Kieferfußsegment. Schwache Vergrößerung. Nach E. Haase.

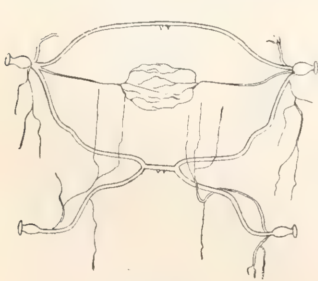


Fig. 4.
Scolioplanes acuminatus Leach. Die zwei letzten Stigmenpaare, nebst Anastomosen, etwas vergrößert. Nach E. Haase.

taschen im Sinne der Diplopoden. Das Ovarium ist unpaar, mündet aber mit einem oder auch mit zwei Ovidukten nach außen. Die Hodenzahl ist sehr verschieden; bei zahlreichen Hoden pflegen sie paarweise zusammenzuliegen.

3. Entwickelung. a) Die Embryonalentwickelung (Epimorpha). Die Furchung der sehr dotterreichen Eier ist scheinbar total; es entwickeln sich Dotterpyramiden, d. h. von oberflächlich polygonalen Zellabschnitten gehen radienartig ins Innere die Abgrenzungen, die aber innen abgekürzt, also unvollständig sind. Im ungefurchten Eizentrum findet man die Mehrzahl der Furchungszellen, doch wandert eine Anzahl Kerne nach außen zwischen den Pyramiden (Zwischenzellen). Diese Zwischenzellen vermehren sich, gelangen an die Oberfläche und bilden ein Blastoderm. Die Keimstelle wird durch besonders starke Zellvermehrung bezeichnet und ist mehrschichtig im Gegensatz zum einschichtigen Blastoderm. Diese Embryonalanlage wächst allmählich von hinten nach vorn aus und liefert das Mesoderm als zwei parallele Streifen, die sich nach vorn etwas verbreitern. Eine Rinnenbildung (Gastrulation) findet nicht statt. Die Dotterpyramiden mit den Nährstoffen im Eiinnern liefern das Entoderm. Als erste Anzeichen einer Segmentierung erscheinen drei Segmente in gewissem Abstand vom Hinterende. Eine die Mundöffnung andeutende Grube tritt früher auf als der After. Indem der Embryonalkörper bedeutend in die Länge wächst, läßt er sich als Keimstreifen bezeichnen. Eine Keimstreifenkrümmung geschieht unter seitlichem Auseinanderrücken der Hälften des Keimstreifens, die in der Mediane nur vorn und hinten zusammenhängen. Dabei wird die dazwischen befindliche Ventralmembran verbreitert und schließlich in der Mitte quer eingeknickt, so daß sich Vorder- und Hinterende des Körpers nähern. Danach wird jede Keimstreifhälfte verbreitert und der Dotter allmählich in den sich mehr und mehr abhebenden Embryo eingeschoben. Durch ein über den hinteren Maxillen sitzendes Paar von Eizähnen wird die Eischale gesprengt. Mit dem Abwerfen der Embryokutikula beginnt die nachembryonale Entwicklung.

b) Die nachembryonale Entwickelung. Man unterschied bei dieser früher Epimorphose und Anamorphose, je nachdem beim Sprengen der Eischale bereits die endgültige Beinpaarzahl erreicht war oder erst mehrere Larvenstufen durchlaufen werden mußten, die eine geringere, aber allmählich gesteigerte Beinpaarzahl besitzen. Später wurde nachgewiesen, daß auf die anamorphotischen Stufen eine Reihe anderer epimorphotischer folgen und deshalb der Begriff Hemianamorphose aufgestellt. Die echte Anamorphose kommt bei den Chilopoden überhaupt nicht vor. Mit Hemianamorphose aber entwickeln sich Scutigeridae und Anamorpha und zwar folgen einem Fötusstadium 4 (bis 5) Larvenstufen mit 7, 8, 10 und 12 Beinpaaren. Das erste Entwickelungsstadium mit der auch den Erwachsenen zukommenden Zahl von 15 Beinpaaren wird als Agenitalis von mehreren weiteren Entwickelungsstufen (Immaturus, Praematurus und Pseudomaturus) unterschieden. Die Geschlechtsreife wird je nach den Arten in mehr oder weniger zahlreichen Stufen erreicht, indem auch Pseudomaturus und Maturus durch 1 oder 2 Stufen zum Ausdruck kommen können. Die Epimorphose ist den Epimorpha eigentümlich und zwar beginnt sie bei den Geophilomorpha mit einem Peripatoidstadium, dessen Laufbeine noch als ungegliederte oder doch unvollkommen gegliederte Stummel erscheinen, der Zahl nach jedoch mit den Beinpaaren der Erwachsenen übereinstimmen. Es folgt ein Fötusstadium mit gegliederten aber noch nicht ganz fertigen Beinen, ferner mit noch unvollkommen entwickeltem Tracheensystem und daher Hautatmung. Mit dem 1. Adoleszensstadium tritt die definitive, uneingeschränkte Tracheenatmung ein und die Dotterreste werden aufgebraucht. Weitere Veränderungen beschränken sich, von den Fortpflanzungsorganen abgesehen, auf die Vermehrung der Zahl der Elemente bestimmter Organe. Bei den Scolopendromorpha verläuft die Epimorphose ähnlich, doch verlassen sie das Ei in einem reiferen Zustande, indem ein Peripatoidstadium nicht zur Ausprägung gelangt, vielmehr der Fötus das Ei verläßt und auch schon funktionierende Stigmen besitzt, denen ein Schutzkegel beigegeben ist, der mit der nächsten Entwickelungsstufe wieder verschwindet.

4. Biologie. Die sich mit Hemianamorphose entwickelnden Chilopoden legen ihre Eier einzeln ab und können ihnen daher keine eigentliche Pflege zuteil werden lassen. Desto ausgiebiger geschieht das bei den Epimorpha, die eine größere Zahl von Eiern in einer Vertiefung unterbringen. Das Muttertier deckt oder umringelt mit seinem Körper die Eier und später auch noch einige Zeit die junge Brut. Der Verbrauch des Dotters im Darmkanal bezeichnet für diese den Zeitpunkt, bis zu dem sie unter mütterlicher Obhut verbleiben können. Alle Chilopoden sind Räuber, die durch Vermittelung der in den Kieferfüßen enthaltenen Giftdrüsen ihre Opfer bewältigen. Der allgemeinen verschiedenen Körpergestalt entsprechend ist auch der

Hauptschauplatz der Tätigkeit bei den verschiedenen Gruppen verschieden. Die Spinnenasseln jagen mit reißender Schnelligkeit an Wänden, Steinen und Bäumen nach Fliegen und anderen Insekten. Die Steinläufer eilen im Laubwerk des Waldbodens umher und jagen dort auf Schnecken, Collembolen und auch die eigenen Genossen. Viele Erdläufer schieben sich mit ihrem dünnen, langen Körper in die Röhren der Bodenwürmer und bewältigen deren Bewohner. Große Skolopender, deren Biß schon beim Menschen Lähmungen hervorgerufen hat, dürften in den Tropen selbst kleinen Säugetieren verderblich werden. Uebrigens ist, wenigstens in der Gefangenschaft, auch eine vegetabilische Ernährung beobachtet worden.

5. Geographie. Alle Chilopoden sind Landbewohner und nur wenigen Arten ist die Nähe des Meeres nicht nur erträglich, sondern sie haben sich an die Gezeiten so gewöhnt, daß sie periodisch von der Flut überspült werden. Einzelne Arten bevorzugen auch die Ufer von Bächen und Flüssen. Eigentliche Höhlentiere sind unter den Lithobiiden bekannt geworden. In den europäischen Hochgebirgen und im hohen Norden sind es ebenfalls Lithobiiden, die sich als besonders widerstandsfähig bewiesen haben. Scolopendromorpha und Scutigeridae sind dagegen besonders wärmebedürftig; man hat nordwärts der Alpen Scolopendra niemals beobachtet und Scutigera höchstens an Stellen zu denen sie verschleppt wurde. Geophilomorpha heimaten fast in allen Ländern und Breiten, nehmen aber nach den Polen zu schnell ab. Im Vergleich mit den Diplopoden zeigen sich die Chilopoden-Gattungen durchschnittlich als viel weiter verbreitet.

III. Progoneata.

Die Progoneata, zu denen die Diploda gehören, zerfallen in folgende 3 Klassen:

a) Klasse **Symphyla (Zwergfüßler).** Das Atmungssystem mündet nur mit einem Stigmenpaar am Kopfe. Rumpf mit 12 (11) Beinpaaren und am Hinterende mit einem Paar großer, weit nach hinten vorragender und von Spinndrüsenkanälen durchsetzter Spinngriffel. Hautskelett chitinig. Antennen schnurförmig und vielgliedrig, weder dichotomisch geteilt, noch am Ende mit auffallenden Sinnesorganen. Hierhin gehört nur eine Familie weißer, höchstens 8 mm Länge erreichender Tierchen, der Scolopendrellidae.

b) Klasse **Pauropoda (Wenigfüßler).** Die Atmung findet nur durch die Haut statt, ein eigentliches Atmungssystem fehlt vollständig, ebenso das Gefäßsystem, das den anderen Progoneaten zukommt. Rumpf mit 9 Beinpaaren, am Hinterende weder mit Spinngriffeln noch mit Spinndrüsen. Hautskelett chitinig. Antennen aus einem viergliedrigen Schaft bestehend und dann in 2 Glieder dichotomisch geteilt, von denen das vordere 2 und das hintere 1 Geißel trägt. Zwischen den Geißeln des vorderen Gliedes findet sich noch ein kugeliges Sinnesorgan. Die hierhin gehörigen Tiere sind bei weitem die kleinsten Progoneaten, die meistens nicht über $1\frac{1}{2}$ mm Länge erreichen; sie werden auf 3 Familien verteilt, von denen die bekannteste, die Pauropodidae, mit Pauropus Huxleyi auch in Deutschland vorkommt.

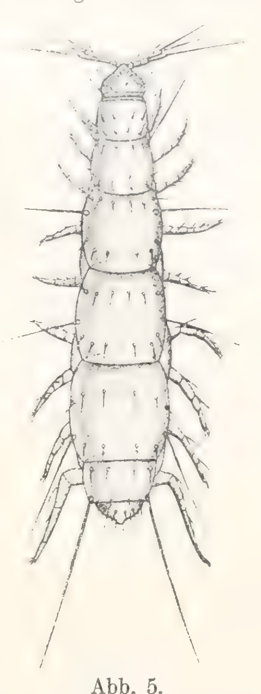
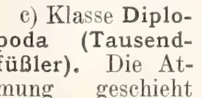


Abb. 5. Pauropus Huxleyi Lubbock. Stark vergrößert. Nach R. Latzel.



c) Klasse **Diplopoda (Tausendfüßler).** Die Atmung geschieht immer durch Tracheensysteme, die niemals am Kopf ausmünden, vielmehr in segmentaler Folge in Stigmenpaaren von geringerer oder größerer Zahl stets am Rumpf. Die Zahl der Beinpaare schwankt von 13 bis weit über 100. Am Hinterende des Rumpfes können bei einigen Gruppen Spinngriffel auftreten, aber diese bleiben stets klein im Vergleich mit dem sie tragenden Präanalsegment, niemals erhalten sie wie bei den Symphylen eine solche Entwickelung, daß sie den hinteren Körperpol ganz einnehmen. Hautskelett chitinig und außerdem fast immer mit einem starken Kalkmantel. Wenn dieser jedoch fehlt, dann besitzen die Tiere zahlreiche große und verschiedenartig gestaltete Trichome. Antennen weder schnurförmig noch dichotomisch geteilt, vielmehr stets aus 7 bis 8 (9) Gliedern zusammengesetzt, deren letztes 4 bis zahlreiche Sinneskegel trägt. Diese sehr formenreiche Tierklasse übertrifft an Zahl der Arten, Gattungen und größeren Gruppen die Chilopoden, Symphylen und Pauropoden zusammengenommen noch ganz bedeutend. Ihre Angehörigen sind überaus verschieden nach Gestalt und Größe.

Diese schwankt von 2 mm bis zu mehr als 25 cm.

1. Systematik. Auch die Tausendfüßler zerfallen in zwei Unterklassen:



Abb. 6. Polyxenus lagurus aut. Stark vergrößert. Nach Bode.

I. Pselaphognatha Latzel 1884. Die Unterkiefer bilden ein schwaches und ungewöhnlich gestaltetes Gnathochilarium, das in tasterartige Stäbe ausgezogen ist. Die Schläfenorgane des Kopfes sind als drei große, in Bechern stehende Borsten entwickelt. Körper ohne Kalkskelett, mit zahlreichen Trichomen, die an den Ringseiten und am Rumpf-Hinterende zu büschel- oder pinselartigen Massen vereinigt sind. Tracheentaschen schwach und tracheenartig, Tracheen dichotomisch verzweigt. Rumpf mit 13 Beinpaaren. Sternite schwach und hautartig. Männchen weder mit Telopoden noch mit Gonopoden. Entwickelung mit Anamorphose. Die einzige hierhin gehörige Familie Polyxenidae enthält zugleich die kleinsten Diplopoden. In Deutschland lebt Polyxenus lagurus aut.

II. Chilognatha Latreille 1802. Die Unterkiefer bilden ein bald stärkeres bald schwächeres Gnathochilarium, das meistens jederseits 2 bis 3 (4) kurze Taster trägt, aber niemals in tasterartige Stäbe ausgezogen ist. Die Schläfenorgane, soweit sie überhaupt vorhanden sind, bestehen in Vertiefungen, aus denen niemals eine lange Borste hervorragt. Körper mit Chitin- und außerdem mit Kalkskelett, aber niemals mit Trichomen, die zu Büscheln oder Pinseln vereinigt sind. Tracheentaschen meistens kräftig gebildet, jedenfalls nicht tracheenartig. Rumpf mit 17 bis zahlreichen Beinpaaren. Männchen entweder mit Telopoden oder mit Gonopoden. Sternite fest ausgeprägt, stets Träger der Stigmen. Diese reichhaltige, durch Tausende von Arten gebildete Unterklasse zerfällt zunächst wieder in zwei Ueberordnungen:

A. Ueberordnung Opisthandria Verhoeff 1894. Die Sternite der Laufbeinsegmente bestehen aus 2 getrennten Stücken. 1. und 2. Laufbeinsegment mit Tracheensystemen. Wenn Wehrdrüsen vorkommen, treten sie in der Rückenmitte auf. Gnathochilarium mit unpaarer Lamella lingualis. Die Männchen besitzen Telopoden vor dem Telson. Die Entwickelung verläuft mit Hemianamorphose, indem die Tätigkeit der Sprossungszone frühzeitig erlischt.

1. Ordnung Limacomorpha. Körper länglich, mit 35 Beinpaaren. Gnathochilarium mit Lamellokardines. Schläfenorgane mit weiter Oeffnung. Männchen mit einem Telopodenpaar. Die Sternithälften der Laufbeinsegmente sind schwach entwickelt und reichen nach außen wenig über die Hüften hinaus, innen sind sie stark genähert. Einzige Familie Glomeridesmidae.

2. Ordnung Oniscomorpha. Körper gedrungen und in eine den Kopf zur Bergung bringende Kugel einrollbar, mit 17 (19) oder 21 (23) Beinpaaren. Gnathochilarium mit Lamellokardines oder mit selbständigen und besonders großen Kardines. Männchen entweder mit 2 Telopodenpaaren oder mit einem und davor 1 Paar schwacher Nebentelopoden. Die Sternithälften der Laufbeinsegmente sind stark entwickelt, reichen nach außen weit über die Hüften hinaus und bleiben innen weit voneinander entfernt. Es gehören zu dieser Ordnung die folgenden beiden Gruppen:

a) Unterordnung Chorizocerata. Die Antennen sind sehr weit voneinander entfernt. Collum breit und mit Seitenflügeln, Brustschild nur aus einem Tergit bestehend. Schläfenorgane sehr tief liegend und mit rundlichem Porus mündend. Rumpf mit 11 Paar Pleuriten, deren letztes gelenkig am Präanalschild sitzt. 21 (23) Beinpaare, beim Männchen 2 Paar Telopoden. Breite Lamellokardines haben die Stipites des Gnathochilariums schräg nach außen gedrängt. Zu der Familie Sphaerotheriidae gehören tropische, z. T. recht stattliche Kugeltiere.

b) Unterordnung Plesiocerata. Die Antennen stehen der Mediane bedeutend näher. Collum schmäler, ohne Seitenflügel. Das Brustschild ist ein Bisyntergit, entstanden aus der Verwachsung des 2. und 3. Rumpftergits. Schläfenorgane groß und durch einen in starkem Bogen sich krümmenden Spalt geöffnet. Rumpf mit 10 Paar Pleuriten, deren letztes sich vor dem Präanalschild befindet. Die Kardines bleiben von der Lamella lingualis vollkommen getrennt und die Stipites des Gnathochilarium sind nicht schräg nach außen gedrängt, sondern ungefähr von vorn nach hinten gerichtet. Unter mehreren Familien, die hauptsächlich in den gemäßigten Breiten heimaten, sind die auch in Deutsch-

land durch 3 Gattungen vertretenen Glomeridae die bekannteste.

B. Ueberordnung Proterandria Verhoeff 1894. Die Sternite der Laufbein segmente bestehen aus einem geschlossenen Stück; 1. und 2. Laufbeinsegment ohne Tracheensysteme, diese beginnen erst am 3. Laufbeinsegment. Wenn Wehrdrüsen vorkommen, treten sie stets in den Seitengebieten des Rumpfes auf. Gnathochilarium mit 2 getrennten Lamellae linguales, abgesehen von den seltenen Fällen, in denen es nach vorn in eine Spitze ausgezogen ist. Die Männchen besitzen am 7. Rumpfring 1 oder 2 Paar Gonopoden, nicht selten auch noch Nebengonopoden. Die Entwickelung verläuft mit Anamorphose, indem die Sprossungszone bis ins Stadium der Geschlechtsreife erhalten bleibt. Die Proterandria zerfallen in folgende 4 Ordnungen:

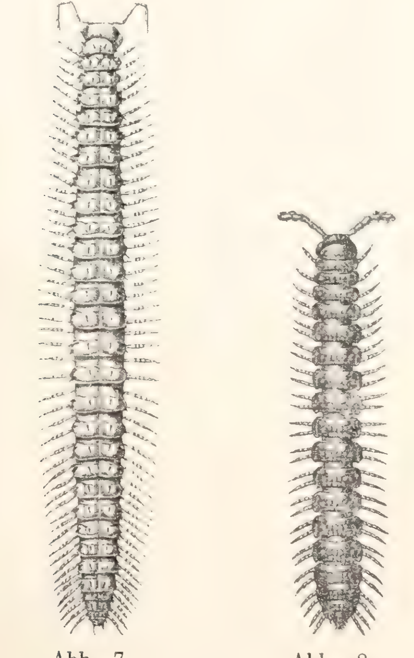


Abb. 7. Craspedosoma alemannicum Verhoeff. Vergrößert. Abb. 8. Polydesmus testaceus C. Koch. Vergrößert. Nach A. Humbert.

3. Ordnung Colobognatha. Mandibeln mehr oder weniger schwach entwickelt; ihre Backenteile sind verkümmert. Schläfenorgane fehlen. Die Sternite des Rumpfes sind frei beweglich, Wehrdrüsen treten in segmentaler Folge auf. Zahlreiche Hüften besitzen Coxalsäcke. Körper mit mehr als 30 Rumpfringen. Gonopoden werden gebildet durch die hinteren Gliedmaßen des 7. und vorderen des 8. Rumpfringes. Es gibt mehrere Familien, von denen eine, die Polyzoniidae mit einer Art auch in Deutschland vertreten ist.

4. Ordnung Ascospermophora. Mandibeln und ihre Backen sind kräftig entwickelt. Sternite des Rumpfes alle frei beweglich, Rumpf mit 26, 28, 30 oder 32 Ringen. Wehrdrüsen fehlen an allen Segmenten. Schläfenorgane vorhanden, mit rundlichem Kanal. Coxalsäcke fehlen, mit Ausnahme des 8. männlichen Rumpfringes. Am Rumpfhinterende münden die Spinndrüsen in kleinen Spinngriffeln. Gonopoden sind als vordere Gliedmaßen des 7. Rumpfringes immer vorhanden, meist auch als hintere, oft sogar noch an anderen benachbarten Segmenten. Die zahlreichen hierhin gehörigen Familien sind über die alte und neue Welt verbreitet, besonders reichlich aber in den Gebirgen Europas vertreten. Die Ordnung ist ausgezeichnet durch sehr mannigfaltige und merkwürdige Fortpflanzungsorgane.

5. Ordnung Proterospermophora. Mandibeln und ihre Backen sind kräftig entwickelt. Rumpf mit 19 bis über 50 Ringen, aber niemals mit den Ringzahlen der Ascospermophora. Wehrdrüsen sind vorhanden. Als Gonopoden sind immer nur die vorderen Gliedmaßen des 7. Rumpfringes entwickelt.

Die Ordnung zerfällt in die beiden folgenden Gruppen:

a) Unterordnung Polydesmoidea. Rumpf meist mit 20, seltener mit 19, 21 oder 22 Ringen. Ocellen fehlen. Die Prosomite der meist in Seitenflügel ausgezogenen Rumpfringe schieben sich mit einem Pleuralzylinder in die Metasomiten ein. Coxalsäcke fehlen. Spinndrüsen und Spinngriffel fehlen. Vulven kurz. Gonopoden auf fester Basis freiliegend. Sternite mit den Pleurotergiten zu geschlossenen Zylindern verschmolzen. Collum ohne Drehzapfen. Eine über die ganze Welt verbreitete, sehr formenreiche Gruppe, deren Familien zum Teil noch wenig geklärt sind.

b) Unterordnung Lysiopetaloidea. Rumpf mit mehr als 37 Ringen. Ocellen stets zahlreich und in Reihen angeordnet. Die Prosomite der im Querschnitt stets kreisrunden Rumpfringe schieben sich in die Metasomite ohne Pleuralzylinder zu bilden. 3. bis 16. Beinpaar mit Coxalsäcken. Spinndrüsen vorhanden und im Präanalsegment mit kleinen Spinngriffeln ausmündend. Vulven auf sehr langen, weit vorstülpbaren Schläuchen sitzend. Gonopoden in eine häutige Tasche eingesenkt und nur teilweise vorragend. Sternite frei beweglich und schräg hintereinander gestellt. Kopf um einen Collumzapfen drehbar. Die drei hierhin gehörigen Familien sind haupt-

sächlich in den Mittelmeerländern verbreitet; anscheinend kommt die Gruppe aber auch in Nordamerika vor.

6. Ordnung Opisthospermophora. Mandibeln und ihre Backen sind kräftig entwickelt. Rumpf mit mehr als 30 Ringen, deren Sternite fast immer mit den Pleurotergiten verwachsen sind, jedenfalls nicht schräg hintereinander gestellt. Die zahlreichen Wehrdrüsen treten in segmentaler Folge auf. Rumpf niemals mit Seitenflügeln, auf dem Querschnitt immer kreisrund. Schläfenorgane fehlen, ebenso die Coxalsäcke. Als Gonopoden sind beide Gliedmaßenpaare des 7. Ringes entwickelt, von denen die hinteren die Spermaleitung besorgen. Vulven kurz. Es gehört hierhin eine ganze Reihe von Familien, nämlich die Mehrzahl der Diplopoden von „iulusartigem" Habitus, darunter die in Europa mit zahlreichen Formen vertretenen Julidae. Unter den hauptsächlich tropisch-subtropischen Familien sind als wichtigste zu nennen die Spirobolidae und Spirostreptidae.

2. Morphologie. Am Kopf der Tausendfüßler ist eine selbständige Oberlippe nicht abgesetzt, aber die Mundöffnung befindet sich zwischen zarten Gebilden, die als Epi- und Hypopharynx zu unterscheiden sind. Als Gliedmaßen sind die niemals besonders langen Antennen zu nennen und die meist recht kräftigen Mandibeln, die mit meist starken Backenteilen verbunden sind. Hinter den Mandibeln folgt eine den Kopf von unten her bedeckende, meist stattliche Klappe, die als Gnathochilarium bekannt ist. Fast immer besteht dieses aus mehreren teils paarigen, teils unpaarigen Bestandteilen und am Vorderrand sitzen 2 bis 3 (4) Paar, gewöhnlich mit Sinneszäpfchen versehene Tastkegel. Das Gnathochilarium ist von einigen als aus 2, von anderen als aus 1 Gliedmaßenpaar, durch Verschmelzung entstanden betrachtet worden und je nach den Gruppen, die man ins Auge faßt, scheint die eine oder andere Anschauung richtiger zu sein. Bei den Pselaphognathen und Pauropoden ist das Gnathochilarium besonders zart gebaut, während sich bei den Symphylen seine Zusammensetzung aus 2 Paar Teilen besonders deutlich zu erkennen gibt, nämlich ganz getrennten Unterkiefern und einer zweiteiligen Klappe darunter. Facetten- oder Pseudofacettenaugen kommen niemals vor, vielmehr handelt es sich, soweit die Tiere nicht überhaupt augenlos sind, um Gruppen von Ocellen, die in einer oder mehreren Reihen lose angeordnet sind. Schläfenorgane, die am ehesten als Vermittler des Gehörsinnes aufgefaßt werden können, sind bei zahlreichen Familien nicht vorhanden, bei den übrigen in ihrer Ausgestaltung sehr verschieden. Der Rumpf zerfällt in Thorax und Abdomen. Zum Thorax gehören 3 Ringe, nämlich das bei Diplopoden stets gliedmaßenlose Collumsegment und 2 weitere mit je 1 Beinpaar ausgerüstete Ringe. Die Grenze zwischen Thorax und Abdomen wird durch die Ausmündungen der Geschlechtswege angezeigt. Meist weichen das 1. und 2. Beinpaar in verschiedenen Bauverhältnissen von den übrigen ab und dann fehlen dem Thorax auch eigene Tracheensysteme (Proterandria). Ist das aber nicht der Fall (Opisthandria), dann ist das Tergit des 2. und 3. Thoraxringes vor den übrigen besonders ausgezeichnet. Das Collum stellt die Verbindung zwischen Kopf und Rumpf her und zwar ist es an das Hinterhaupt in einer nach den Gruppen verschiedenen Weise angepaßt, nimmt in seinen inneren Höhlungen bisweilen die Backen auf, während es in anderen Fällen durch einen Mittelzapfen dem Kopf eine besonders leichte Drehung ermöglicht. Bei den echten Kuglern (Oniscomorpha) ist die physiologische Bedeutung des Collum mehr oder weniger gering geworden, indem es nur noch eine Nackendeckplatte darstellt. Früher glaubte man, daß nur die mit 2 Beinpaaren versehenen Ringe wirkliche Doppelsegmente darstellen, die mit nur 1 Beinpaar ausgerüsteten dagegen als einfache Segmente gelten müßten. Neuerdings sind aber immer mehr Tatsachen bekannt geworden, die zu dem Schluß führen, daß die Doppelsegmente eine allgemeine Grundlage im Bau des Rumpfes der Diplopoden darstellen. Insbesondere konnte Verhoeff nachweisen, daß die Vulven am Vordersegment des 1. Abdominalringes dessen umgewandelte Gliedmaßen sind, für die sich in einigen Fällen sogar noch Sternit und Tracheensysteme feststellen lassen. Am Abdomen folgt auf die oft zahlreichen 2 Beinpaare führenden Diplosomite ein als Sprossungszone unterschiedener, stets beinpaarloser Abschnitt und auf diesen das Telson, das den Rumpf hinten abschließt. Die Sprossungszone besteht je nach den Arten oder Gruppen und je nach den Jugendformen oder Entwickelten aus 1 oder einer Anzahl (etwa bis 8) Ringen. Sie kann auch bei vollkommen entwickelten Tieren noch aus mehreren Ringen bestehen. Allgemein wird sie bei den Proterandria beobachtet und enthält selbst bei Erwachsenen noch Anlagen von Organen in ihren unvollkommen ausgebildeten Ringen. Das Telson besteht aus 2 Segmenten, dem Präanal- und dem Analsegment. Das Präanalsegment erscheint bei den Oniscomorpha als ein großer dorsaler Hohlschild, während es unter den Proterandria meist als ein unten mehr oder weniger geschlossener Ring

zu beobachten ist. Rückenwärts trägt dieser je nach den Arten oder Gruppen verschiedenartige Auszeichnungen, bei den Ascospermophora und Lysiopetaloidea namentlich kleine Spinngriffel, die zur Führung von Spinnfäden dienen, welche von großen, im letzten Rumpfdrittel sich erstreckenden Spinndrüsen geliefert werden. Das Analsegment umgibt den After und zwar mit 3 Klappen, den einander gegenüberstehenden Analklappen und der darunter befindlichen Subanalplatte. Die Doppelsegmente (Diplosomite) bestehen aus einem Pleurotergit (oder getrennten Pleuriten und Tergiten) und 2 Sterniten, die die Beinpaare tragen. Seltener ist nur ein Sternit und ein Beinpaar vorhanden. Wichtig für die Auffassung der Diplosomite ist die Struktur der Pleurotergite, die bei den Proterandria immer mehr oder weniger deutlich ein Prozonit und Metazonit, teils durch Nähte, teils durch verschiedenartige Strukturen erkennen läßt. Die Atmungssysteme münden bei den Diplopoden immer mit paarig an den Sterniten angeordneten Stigmen aus und die bald dichotomisch verzweigten, bald einfach verlaufenden, aber dann in Büscheln zusammenstehenden Tracheen münden in Tracheentaschen, die zugleich für die Muskulatur eine größere oder geringere Bedeutung haben. Als Phragmen treten am Vorderrand der Prozonite bei vielen Diplopoden quere, innere, dem Ansatz der Längsmuskulatur dienende Ringe auf, die im vordersten Rumpfdrittel besonders breit sind, weil die Muskulatur hier besonders kräftig entwickelt ist. Das Verdauungsrohr besteht aus Vorder-, Mittel- und Enddarm, von denen der 2. sowohl der längste und breiteste als auch der physiologisch wichtigste Teil ist, den man auch Magendarm nennen kann. Gegen den Vorder- und Enddarm ist er mehr oder weniger klappenartig abgesetzt. An der Grenze von Mittel- und Enddarm, oder doch in deren Nähe mündet ein Paar Malpighische Gefäße (Harnorgane) ein, die eine beträchtliche Länge aufweisen und verschiedenartige Windungen besitzen. Als Speicheldrüsen kommen einerseits ein Paar lange tubulöse[1]) Drüsen in Betracht, die im Bereich des Gnathochilarium ausmünden, andererseits 2 bis 3 Paar traubige Drüsen, deren vorderstes sich am Dach der Mundhöhle befindet, während ein 2. den Oesophagus umgibt, ein 3. nach vorn zu Seiten des Mitteldarmes vorkommen kann. Als Afterdrüsen ist ein Paar unterhalb oder oberhalb des Enddarmes gelegener Drüsenmassen bekannt geworden, das in beiden Geschlechtern oder nur beim Weibchen auftritt. Das Blutgefäßsystem, das den Pauropoden überhaupt fehlt, ist auch bei den Diplopoden schwächer entwickelt als bei den Chilopoden, was besonders in dem Mangel eines Bauchmarkgefäßes seinen Ausdruck findet. Die weiblichen Geschlechtsorgane bestehen in einem unpaaren, schlauchartigen Sack, der jedoch meistens 2 Eibildungsstreifen enthält. Auch der Ovidukt ist zunächst unpaarig, wird aber weiter nach vorn paarig und mündet in 2 Vulven aus. Aehnlich steht es mit den Vasa deferentia der Männchen, während die verwickelter gebauten Hoden einen mehr paarigen Charakter, übrigens das Bild einer Leiter, darbieten. Die Vasa deferentia münden meistens in 2 getrennten Penes aus.

3. Entwickelung. a) Embryonalentwickelung. Die Eier der Diplopoden stimmen im Dotterreichtum und auch in manchen Punkten der Entwickelung mit denen der Chilopoden überein. Dotterpyramiden im Sinne der Chilopoden scheinen nicht aufzutreten. Bei vielen Diplopoden schiebt sich der Keimstreifen in den Dotter, noch ehe man Anlagen von Gliedmaßen bemerken kann und selbst erst nach einer vollständigen Einknickung desselben beginnen die Anlagen hervorzutreten. In anderen Fällen (Julidae) erstreckt sich der Keimstreifen über einen Teil der Oberfläche und läßt bereits an dieser eine Reihe von Segmenten gegeneinander abgesetzt erkennbar werden. Gleichzeitig bemerkt man an den beiden Körperpolen Einstülpungen, eine tiefere als Anlage des Vorderdarm und eine anfangs kürzere als Anlage des Hinterdarm. Zwischen beiden erstreckt sich als kräftiger Zellenstrang die Anlage des Mitteldarms. Erst dann beginnt eine Querfurchenbildung, durch deren Vertiefung der Keimstreifen allmählich ebenfalls ganz in den Dotter eingesenkt wird. Die Dottermasse, die bei Chilopoden ganz vom Darm umfaßt wird, zeigt bei Diplopoden ein auffallend abweichendes Verhalten, indem sie überhaupt nicht in den Darm gelangt, sondern die Leibeshöhle erfüllend, also rings um den Darm herum, angesammelt ist. Dieser Gegensatz steht wahrscheinlich in physiologischem Zusammenhang damit, daß bei den Diplopoden ein Teil des Dotters für den Aufbau weiterer Segmente aufgespart und durch die Leibeshöhle der Sprossungszone leichter zugeführt wird, während bei der Mehrzahl der Chilopoden überhaupt keine neuen Segmente mehr erzeugt werden. Hinsichtlich der Ausbildung der übrigen Organe verdienen die Mundteile eine besondere Erwähnung: Mehrere Autoren fanden zwischen dem gliedmaßenlosen Collumsegment

[1]) Nach neueren Untersuchungen stehen sie im Dienst der Putztätigkeit.

und den Anlagen der Mandibeln die Anlagen nur eines Maxillenpaares. Neuerdings hat M. Robinson dagegen 2 Paar Maxillenanlagen nachgewiesen und damit der Homologisierung des Progoneaten- und Opisthogoneaten-Kopfes eine wichtige Stütze geliefert. Merkwürdig ist das Auftreten eines Eizahnes bei einzelnen

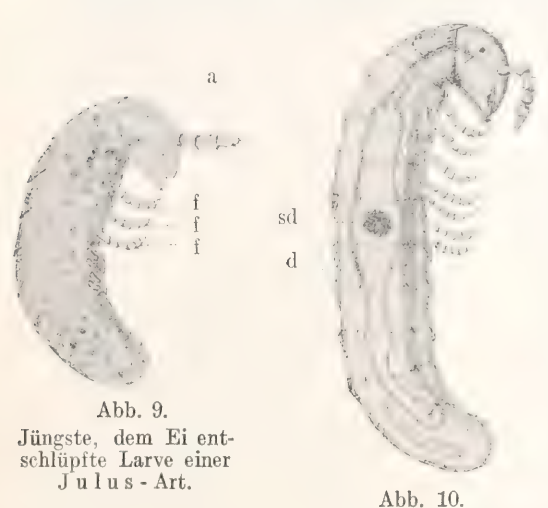


Abb. 9. Jüngste, dem Ei entschlüpfte Larve einer Julus-Art.

Abb. 10. Das 2. Larvenstadium derselben.

Beide erheblich vergrößert. a Antennen; sd Wehrdrüsen; d Darmkanal; f Füße. Nach O. vom Rath.

Diplopoden (Strongylosoma), während er offenbar den meisten abgeht. Dieser Eizahn entspricht aber nicht den bei Chilopoden vorkommenden, da er einerseits unpaar ist und andererseits sich auf der Stirnwölbung vorfindet, also von den Mundwerkzeugen weit abgerückt.

b) Nachembryonale Entwickelung. Eine Epimorphose ist bei den Progoneaten durchaus unbekannt. Die Mehrzahl der Gruppen entwickelt sich vielmehr mit Anamorphose, d. h. jedes weitere Stadium besitzt eine größere Zahl von Segmenten und Beinpaaren als das vorhergehende. Hierbei spielt die schon genannte Sprossungszone eine große Rolle, denn aus ihr, d. h. also zwischen Telson und dem hintersten bereits früher ausgebildeten Ring, gehen die neu hinzukommenden meistens beinführenden Ringe hervor. Die neuen Beinpaare entstehen insofern plötzlich, als sie im vorhergehenden Stadium höchstens als sehr kleine und ungegliederte Höcker zu erkennen sind. Der hinterste Teil der Sprossungszone ist die Sprossungsscheibe. Aus ihr entstehen zunächst gliedmaßenlose Ringe und in einem weiteren Stadium durch abermalige Häutung aus diesen beintragende Ringe. Die Häutungen bedürfen einer besonderen Vorbereitungsperiode, der Häutungsstarre, innerhalb deren das alte Kalkskelett teils aufgelöst, teils in Stücke zerschnürt wird. Zahl und Beschaffenheit der Larvenstufen sind nach den Gruppen verschieden und hängen namentlich ab von der Zahl der bei den Erwachsenen vorkommenden Ringe. Bei Polydesmus folgen z. B. folgende Anamorphose-Larven aufeinander:

1.	Larven	mit	7	Rumpfringen	und	3		Beinpaaren,
2.	,,	,,	9	,,	,,	6		,,
3.	,,	,,	12	,,	,,	10	oder 11	,,
4.	,,	,,	15	,,	,,	16	,, 17	,,
5.	,,	,,	17	,,	,,	22	,, 23	,,
6.	,,	,,	18	,,	,,	26	,, 27	,,
7.	,,	,,	19	,,	,,	28	,, 29	,,

Es folgen dann die Erwachsenen mit 20 Ringen und 30 oder 31 Beinpaaren, wobei stets das ♂ ein Beinpaar weniger besitzt als das ♀, weil das vordere des 7. Ringes in Gonopoden umgewandelt ist. Mit der 3. Larvenstufe werden also ♂ und ♀ äußerlich unterscheidbar. Fast alle Progoneaten beginnen die nachembryonale Entwickelung mit 3 Beinpaaren; um so merkwürdiger ist es, daß Polyzonium gleich mit 4 Beinpaaren auftritt. Der aus dem Ei hervorquellende junge Progoneate besitzt nicht immer schon 3 Beinpaare; er macht bisweilen erst ein Pupoidstadium durch, dem die gegliederten Beine noch abgehen.

Eine Hemianamorphose ist den Oniscomorphen eigentümlich, indem bei diesen auf mehrere Larvenstufen mehrere epimorphotische Stadien folgen. Es können zwar, im Gegensatz zu den Proterandria, wo sich geschlechtsreife Individuen nicht mehr häuten, bei den Opisthandria solche Erscheinungen vorkommen, aber in der Hauptsache sind die früheren Behauptungen der Häutung Entwickelter darauf zurückzuführen, daß man die epimorphotischen Stufen noch nicht erkannt hatte. Bei Glomeris gibt es folgende Larvenstufen:

1.	mit	3	Beinpaaren	8	Tergiten	ohne	Ocellen	und	5	Antennengliedern
2.	,,	8	,,	9 (10)	,,	mit	3	,,	,,	5	,,
3.	,,	10	,,	10 (11)	,,	,,	3 bis 4	,,	,,	6	,,
4.	,,	13	,,	11 (12)	,,	,,	5	,,	,,	8	,,
5.	,,	15	,,	12 (13)	,,	,,	6	,,	,,	8	,,

Das nächste Stadium mit 17 Beinpaaren und 13 Tergiten stimmt hierin zwar mit den Erwachsenen überein, unterscheidet sich von ihnen aber nicht nur bedeutend in der Größe und oft auch Färbung, sondern namentlich in den Geschlechtsorganen und Fortpflanzungswerkzeugen.

4. Biologie. Bei der Mannigfaltigkeit der Tausendfüßler kann hier über Eierablage und Brutpflege nur einiges Charakteristische herausgegriffen werden: Polyzonium-Weibchen umfassen in eingekrümmter Haltung mit ihrem abgeplatteten und hierfür besonders geeigneten Körper das Eierhäuflein und schützen es so lange, bis die jüngsten Lärvchen ausschlüpfen. Der scharf riechende, milchige Wehrsaft ist nicht nur geeignet Feinde abzuwehren, sondern auch die Entwickelung von Pilzen zu verhindern, die in der Nähe der Eier diesen verderblich werden könnten. Glomeris legt die Eier einzeln oder zu 2 (3) ab und umgibt sie mit einer Kapsel von Lehm oder humösen Fäces, die wahrscheinlich der After um sie anlegt. Die Eier werden an der Wand eines solchen einfachen oder doppelten Kämmerchens angeklebt. In anderen Fällen, z. B. bei Polydesmus, werden zahlreiche Eier zu einem Häuflein aufgeschichtet und dieses von einer halbkugeligen Glocke umhüllt, an deren Gipfel sich eine die Ventilation erleichternde Oeffnung vorfindet. In beiden Fällen aber, bei Glomeris und Polydesmus befindet sich eine Luftschicht zwischen der Erdhülle und den Eiern. Polyxenus soll seine Eier mit den Trichomen des eigenen Körpers anschützend bedecken. Räuber im Sinne der Chilopoden sind unter den Diplopoden nicht bekannt, indem diese vorwiegend von abgestorbenen Pflanzenteilen sich ernähren, wie Falllaub, Humus, Mulm, Borkenstückchen. Es werden aber von manchen Arten auch grüne Gewebe verzehrt und zwar nicht nur Moose, sondern sogar Blätter phanerogamer Gewächse, unter Umständen auch Früchte, Knollen, Zwiebeln. Auch Leichen von Tieren können von Diplopoden befallen werden, namentlich ist hier Typhloblaniulus guttulatus zu nennen. Als gelegentliche Räuber sind nur einige Lysiopetaliden bekannt geworden. Die Schnelligkeit der Bewegung hängt nicht von der Zahl sondern von der Länge der Beine ab. Die Tausendfüßler sind als im allgemeinen lichtscheue Tiere mit Unrecht angesprochen worden, denn die meisten Arten verschmähen Plätze, die keinen Sonnenschein erhalten. Direktes volles Sonnenlicht ist allerdings wenigen Arten erträglich, aber diffuser Sonnenschein, wie er durch das Laubdach der Wälder und Gebüsche gedämpft hindurchdringt, ist wenigstens zeitweise erwünscht. Die einzelnen Arten verhalten sich hinsichtlich der Menge der ihnen zusagenden Belichtung, Erwärmung und Feuchtigkeit höchst verschieden. Die Copula ist bei vielen Formen beobachtet worden und gestaltet sich verschieden nach dem Bau der Copulationsorgane und nach der Beschaffenheit des Spermas. Bei den Proterandria überträgt das Männchen aus den meist in zwei getrennte Penes auslaufenden Vasa deferentia das Sperma unter Einkrümmung des Vorderkörpers meistens an die Gonopoden des 7. Rumpfringes. An diesen befinden sich Kanäle oder Rinnen oder Taschen, aus denen das Sperma dann sekundär erst bei der Copula auf das Weibchen an oder in die hinter dem 2. Beinpaar gelegenen Vulven übertragen wird. Die männlichen Fortpflanzungswerkzeuge sind in manchen Gattungen so verwickelt gebaut, daß man in der ganzen Tierwelt nichts Merkwürdigeres in dieser Hinsicht wird auffinden können. Dementsprechend ist auch die Spermaübertragung bisweilen viel komplizierter als es hier angedeutet wurde. Als Verteidigungsmittel kommen Wehrsäfte den meisten Familien zu und zwar bisweilen nicht nur ätzende, sondern auch solche von einem überaus durchdringenden Geruch (Lysiopetalidae). Manche Formen sind durch Kleinheit geschützt oder die der Umgebung überaus ähnliche Färbung, einige sehen wie Kalkkrümchen aus, namentlich wenn sie sich eingerollt haben (Gervaisia). Die Einrollung ist ein Schutzmittel aller Oniscomorpha, eine Reihe interessanter Anpassungen an diesen Vorgang können hier nicht besprochen werden, doch sei eines Schismas gedacht, welches am Brustschildrand der Glomeriden vorkommt und bestimmt ist die Seitenlappen der nachfolgenden Tergite bei der Einrollung aufzunehmen. Die Bewegung der Diplopoden wurde lange Zeit fälschlich als eine kriechende geschildert. In Wirklichkeit sind sie Spitzengänger, d. h. sie schweben elegant und zugleich unter einer von hinten nach vorn fortschreitenden Wellenbewegung der Beine, über die Unterlage dahin, indem sie dieselbe nur mit den Krallenspitzen berühren.

5. Geographie. Auch die Diplopoden sind ausnahmslos Landbewohner und hinsichtlich ihres Aufenthaltes an den Meeresküsten gilt dasselbe wie für die Chilopoden. Ihre Verbreitungsmittel sind im allgemeinen äußerst gering, daher ist ihre Bodenständigkeit ungewöhnlich groß. Natürliche Schranken, wie z. B. breitere Flüsse haben für sie eine viel größere Bedeutung als für die meisten anderen Tiergruppen, auch bestimmte geologische Formationen

kommen für viele Diplopoden weit mehr in Betracht als für die meisten anderen Tiere. Sie sind darum geeignet, uns noch heutigen Tages faunistische Verhältnisse zu beurkunden, die bei der übrigen Tierwelt mehr oder weniger stark verwischt sind, oder überhaupt nicht mehr erkennbar. In Deutschland z. B. weisen der Osten und Westen oder Norden und Süden überraschend große Faunengegensätze auf. Die Areale der einzelnen Arten zeigen, von ganz bestimmten Ausnahmen abgesehen, einen überaus strengen Zusammenhang: alles Umstände, die den Tausendfüßlern für den weiteren Ausbau der Tiergeographie eine grundlegende Bedeutung zusprechen. In der allgemeinen Verbreitung über die Erde bemerkt man ähnlich auffallende Züge, wie sie die Fauna eines bestimmten Landes zeigt, insofern als ganze Familien oder sogar Unterordnungen auf bestimmte Ländergruppen oder Erdteile beschränkt sind. Zwischen Nordamerika und Europa z. B. findet man in der Diplopoden-Fauna höchst geringe Uebereinstimmungen und zwar selbst in den Gattungen, von den Arten ganz zu schweigen; denn von offenkundiger Verschleppung abgesehen, besitzen beide Erdteile keine Art, die mit Sicherheit als gemeinsam bezeichnet werden könnte. Einen verhältlich großen Prozentsatz an Arten stellen die Diplopoden zur Fauna der Hochgebirge, wobei zu beachten ist, daß sich in denselben sowohl solche Formen vorfinden, welche auch anderwärts leben, als auch Tiere, die man ausschließlich in den Hochgebieten antrifft. Für die Alpenländer im ganzen sind sogar verschiedene endemische Gattungen bekannt geworden. Eine nicht geringe Zahl von Tausendfüßlern wurden in Höhlen, namentlich innerhalb Europas entdeckt. Teilweise kennt man die betreffenden Formen nur aus einer einzigen Höhle. Manche Arten, z. B. Brachydesmus subterraneus Heller sind nicht ausschließlich in Höhlen zu Hause, sondern wurden an schattigen Plätzen auch oberirdisch angetroffen.

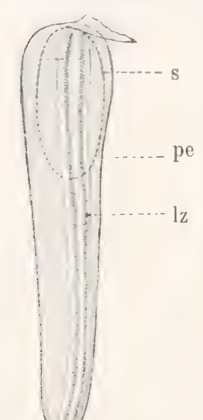


Abb. 11. Arthrosphaera dentigera Verhoeff. Ein Stigma von außen gesehen. lz die Zähnchenlippen; pe Peritrema; s Gang, der in die Tracheentasche führt. Vergrößert. Nach K. W. Verhoeff.

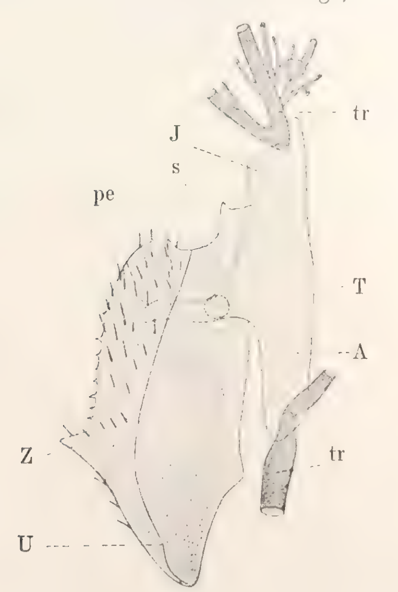


Abb. 12. Arthrosphaera dentigera Verhoeff. Hälfte eines der mittleren Sternite (V) nebst zugehöriger Tracheentasche (T); A Außensack; I Innensack derselben; tr die in die Tracheentasche einmündenden Anfangstracheen; pe Peritrema; s Gang in die Tracheentasche; Z Sternitzahn. Vergrößert. Nach K. W. Verhoeff.

Literatur. Chilopoda: ***R. Latzel,*** *Die Myriapoden der österreichisch-ungarischen Monarchie. Wien 1880. 1. Bd. Die Chilopoden, 228 S. u. 10 Tafeln.* — ***O. Duboscq,*** *Recherches sur les Chilopodes. Arch. Zool. exper. et génér. Paris 1898. S. 481 bis 655. Mit Abb. u. 7 Taf.* — ***E. Haase,*** *Die indisch-australischen Chilopoden. Dresden 1887. Ber. kgl. zool. anthr. Mus. Nr. 5 118 S. 6 Taf.* — ***R. Heymons,*** *Entwickelungsgeschichte der Skolopender. Bibliotheca Zoolog. 240 S. 14 Taf. 1901.* — ***K. W. Verhoeff,*** *Chilopoda. In Bronns Klassen u. Ordnungen des Tierreichs. Leipzig 1902 bis 1908. 63. bis 82. Lieferung 310 S. 20 Taf.* — ***C. Attems,*** *Synopsis der Geophiliden. Zoolog. Jahrbücher. Jena 1903 S. 155 bis 302 5 Taf.* — ***K. Kräpelin,*** *Revision der Scolopendriden. Mitt. naturhist. Mus. Hamburg 1903 276 S. u. Abb.* — ***K. W. Verhoeff,*** *vgl. Morph. Stud. üb. coxopleurale Körperteile der Chilopoden, namentlich der Scolopendromorpha. Nova Acta Halle 1906, 44 Abb. 152 S.* — ***Derselbe,*** *Ueber Scutigeriden 6 Aufsätze 1904 und 1905 Sitz.Ber. Ges. nat. Fr. Berlin u. Zool. Anz. 196 S. 1 Taf.* — ***Derselbe,*** *Ueber Tracheaten-Beine Chilopoda u. Hexapoda Nova Acta Halle 1903/4 1 S. 4 Taf.* — ***Derselbe*** *Ueber Tracheaten-Beine Hüften und Mundbeine der Chilopoden. Arch. f. Nat. Bd. I H. 2 1904 33 S. 2 Taf.* — ***Derselbe,*** *Ueb. Entwickelungsstufen d. Lithobiiden usw. Zoolog. Jahrbücher 1905 Supplem. VIII 104 S. 3 Taf.* **Progoneata: a) Symphyla:** ***B. Grassi,*** *1886 Morfologia delle Scolopendrelle Mem. d. Reale Accad. d. Scienze di Torino Ser. 2a t. XXXVII S. 593 bis 624 u. 2 Taf.* — ***H. J. Hansen,*** *1903 The Genera and Species of the Order Symphyla. Quart. Journ. Microsc. Sci. Vol. 47 101 Seiten 7 Tafeln. Vgl. auch unter Diplopoda.*

b) Pauropoda: ***F. C. Kenyon,*** *1895 The Morphology and Classification of the Pauropoda with notes on the morphology of the Diplopoda. Tufts College Studies N. IV Mass. S. 77 bis 146 4 Taf.* — ***F. Silvestri,*** *Pauropoda. In Acari Myriapoda et Scorpiones hujusque in Italia reperta. Portici 1902 80 S. 56 Abbild. — Vgl. auch unter Diplopoda.* **c) Diplopoda:** ***R. Latzel,*** *Die Myriapoden der österreichisch-ungarischen Monarchie. 2. Bd. Die Symphylen, Pauropoden und Diplopoden. Wien 1884 414 S. 16 Taf.* — ***O. vom Rath,*** *Beitr. z. Kenntn. d. Chilognathen. Bonn bei Cohen. 1886. 38 S. 3 Taf.* — ***Derselbe,*** *Zur Biologie d. Diplop. u. Fortpflanzung d. Diplop. Ber. d. nat. Ges. Freiburg i. B. 1890 und 1891. 64 S.* — ***K. W. Verhoeff,*** *Beiträge zur Kenntnis paläarktischer Myriapoden. 1895 bis 1901 mit 38 Tafeln und Abbildungen. Verh. zool. bot. Ges. Archiv f. Nat. Zoolog. Jahrbücher u. Nova Acta in Halle.* — ***F. Silvestri,*** *Diplopoda Anatome (Segmenta, Tegumentum, Musculi). In Acari Myriapoda et Scorpiones in Italia reperta. Portici 1903 272 S. 4 Tafeln und zahlreiche Abbild.* — ***C. Attems,*** *System der Polydesmiden. Denkschr. d. math.-nat. Kl. kais. Akad. Wien 1898 1. Teil 262 S. 11 Tafeln; 2. Teil 1899, 186 S. 6 Taf.* — ***F. G. Heathcote,*** *The early development of Julus terrestris. Quart. Journal of micros. Science Vol. 26 1886 S. 219 bis 240 2 Taf.* — ***C. Hennings,*** *Das Tömösvar. Organ d. Myriap. Zeitschr. f. wiss. Zool. 1904 und 1906. 81 S. 3 Taf.* — ***K. W. Verhoeff,*** *Ueber Diplopoden. 21. bis 45. Aufsatz 1902 bis 1911 mit Abbildungen und 25 Tafeln. Archiv für Nat., Zoolog. Anzeiger, Mitt. zool. Mus. Berlin, Sitz.Ber. Ges. nat. Fr., Abh. nat. Ges. Isis Dresden, Jahreshefte Ver. vat. Nat. Württ., Nova Acta in Halle.* — ***H. de Saussure,*** *Histoire naturelle de Madagascar. Paris 1897 und 1902 Atlas mit 15 Taf. Myriapodes 356 Seiten.* — ***K. W. Verhoeff,*** *Die Diplopoden Deutschlands. Zugleich eine allgemeine Einführung in die Kenntnis der Diplopoden.* — ***H. Krug,*** *Beiträge z. Anat. d. Gatt. Julus. Jenaische Zeitschr. f. Nat. 1906. 37 S. und 3 Taf.* — ***W. Effenberger,*** *Beitr. z. Kenntn. d. Gatt. Polydesmus. Jenaische Zeitschr. f. Nat. 1909. 59 S. 4 Taf.* — ***G. Reinecke,*** *Beitr. z. Kenntniß v. Polyxenus. Ebenda 1910. 52 S. 5 Taf.* — ***W. Wernitzsch,*** *Beitr. z. Kenntn. v. Craspedosoma u. d. Tracheensystems d. Diplop. Dissertat. Jena 1910. 60 S. 2 Taf.*

K. W. Verhoeff.

Myriapoda.

Paläontologie.

1. Einleitung. 2. Die fossilen Myriapoden: a) Diplopoda. α) Chilognatha. β) Pselaphognatha. b) Chilopoda. 3. Stammesgeschichte. 4. Biologie und geographische Verbreitung.

1. Einleitung. Die geologische Ueberlieferung der als Myriapoda zusammengefaßten Tierklassen ist äußerst lückenhaft. Ganz vereinzelte Funde wurden im Obersilur Schottlands, im Devon und Unterkarbon von Schottland und England, in der oberen Kreide von Böhmen und Grönland und im Diluvium Kaliforniens gemacht. In etwas größerer Individuenzahl kennen wir fossile Myriapoden nur aus dem Ober-Karbon (Böhmen, England, Schottland, Neu-Braunschweig, Neu-Schottland, Illinois) und aus dem Tertiär, besonders aus dem Bernstein des samländischen Unter-Oligocän.

Nicht nur sehr spärlich sind fossile Myriapoden, sondern ihr Erhaltungszustand — namentlich der paläozoischen Reste — ist meist auch höchst mangelhaft. Nur selten ist die Gesamtzahl der Segmente festzustellen. Ueber Mundwerkzeuge, Form der Sternite, Anheftungsart der Beine, Kopulationsorgane fossiler Formen ist wenig sicheres bekannt. Die Deutung der Formen wird dadurch schwierig, unsicher: wurden doch sogar karbonische und permische Farnreste für Myriapoden gehalten („Trichiulus“ „Palaeoiulus“).

Nur diplopode und chilopode Typen sind fossil bekannt. Von den Symphyla und Pauropoda fehlt bislang jede Spur aus der Vorzeit.

2. Die fossilen Myriapoden. 2a) Diplopoda. Ober-Silur bis jetzt.

Die überwiegende Menge des fossilen Myriapodenmaterials, etwa $^4/_5$ der ungefähr 100 „Arten“, ist den Diplopoden zuzurechnen, oder wenigstens als ihnen nächststehend zu betrachten.

α) Chilognatha; Ober-Silur bis Ober-Karbon, Obere Kreide, Eocän bis Miocän, Diluvium, jetzt.

S. H. Scudder unterschied die meisten palaeozoischen Myriapoda als †Archipolypoda[1]) (†Archidesmidae, †Euphoberidae, †Archiulidae) von den (jüngeren) Diplopoden. Alle dem Kopfe folgenden Segmente von mehr oder weniger kreisförmigem Querschnitt sollten gleichartige Doppelsomite sein, deren Tergalia aus 2 hintereinander liegenden, mehr oder weniger getrennten Ringteilen beständen; jedem Diplosomiten kämen 2 breite (geteilte oder einfache) Sternite mit Stigmen auf jedem zu. Nachdem Peach bei †Pattonia und †Anthracodesmus, A. Fritsch bei †Acantherpestes, †Euphoberia, †Pleurojulus zeigen konnten, daß bei diesen Formen die Brustsegmente, wie bei den kaenozoischen Chilognathen, von den Hinterleibssegmenten verschieden sind, oder nur 1 Beinpaar tragen, fällt ein Moment für die Trennung der †Archipolypoda von den chilognathen Diplopoda weg. Ohne Zweifel sind die „Archipolypoden“ keine homogene Ordnung oder Gruppe; aber einer glatten Aufteilung in das System der rezenten Diplopoden stehen große Schwierigkeiten entgegen, da eine Menge von Organisationsdetails ungenügend bekannt sind.

Bei den †Archidesmidae Scud, mit Seitenflügeln an den Metasomiten (†Archidesmus Peach aus dem Ober-Silur und

---

[1]) Ein † vor dem Namen bedeutet: nur fossil bekannte Gruppe, Gattung oder Art.

der Oldred-Fazies des Devon und †Kampecaris Page aus dem Oldred Schottlands), welche in †Archidesmus loganensis Peach aus dem jüngsten Ober-Silur von



Fig. 1. †Archidesmus Macnicoli Peach (Metasomite mit Seitenflügeln). Unter-Devon, Oldred; Forfarshire, Schottland. Natürliche Größe. Aus Zittel.

Lanarkshire den ältesten bekannten Myriapoden geliefert haben[1]), sind noch keine Diplosomite ausgebildet: die nicht immer alternierend engeren (Prosomite) und breiteren (Metasomite) Segmente mit breiten, ungeteilten? Sterniten sind vollkommen getrennt (Peach).

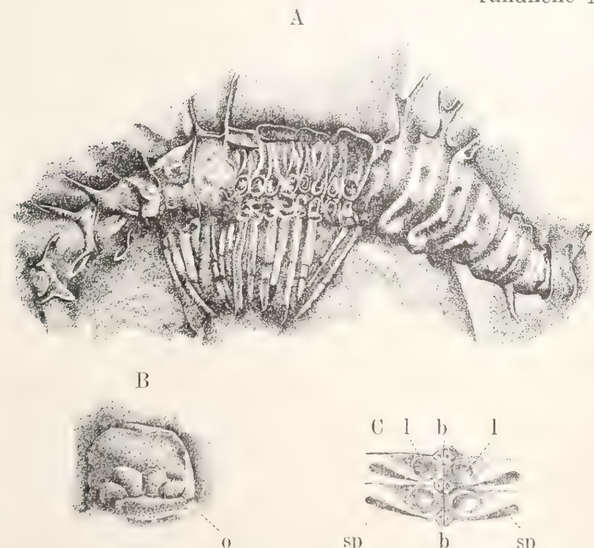


Fig. 2. †Euphoberia ferox Salter sp. A Fragment mit ungegabelten dorsalen und gegabelten lateralen Dornen auf den Metasomiten; in der Mitte sind die Sternite und die langen Füße sichtbar; B Kopf; o Pseudofacettenaugen; C Unterseite zweier Sternite; sp Stigmen, l Artikulationsstelle der Füße, b „minute pores" (Woodward), Branchienöffnungen (Scudder) vergrößert. Ober-Karbon; Dudley, England. Nach H. Woodward.

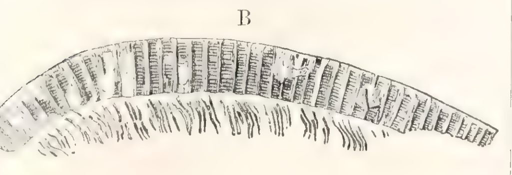
Eine besondere Seitengruppe repräsentieren die †Euphoberidae Scud. (†Macrosterni A. Fritsch) mit †Acantherpestes M. a. W. und †Euphoberia M. a. W. aus dem Ober-Karbon von Illinois, England, Böhmen, †Pattonia Peach aus dem Unter-Karbon Schottlands. In der Form der Tergite erinnern sie an Lysiopetaliden und Polydesmiden (Proterandria); durch die in der Mediane geteilten Sternite zeigen sie andererseits ein Merkmal der Opisthandria. Die engeren Prosomite sind von den wulstigen Metasomiten durch eine Naht getrennt (?). Auf den Seiten der letzteren kommen Wehrdrüsen vor; sie tragen außerdem lange, zum Teil gegabelte Dornen, die jederseits in 2, 3 und mehr Längsreihen auf dem Rücken und den Seiten angeordnet sind. Jedem Pro- und Metasomiten der Rumpfsegmente entsprechen 2, in der Mittellinie durch eine Naht geteilte, breite Sternite und 2 Paare langer Füße. Die Sternite zeigen von außen nach innen: 1. schräge Stigmenschlitze, 2. eine größere rundliche Marke = Ansatzstelle des Fußes (Scudder, Woodward) = Sternalgrube unbekannter Funktion (Fritsch), 3. dicht an der Medianlinie eine kleine „Branchienöffnung" (Scudder) = „minute pore" (Woodward) = Ansatzstelle des Fußes (Fritsch). Bei †Euphoberia hystrix beobachtete Fritsch nur an jedem zweiten Sterniten Stigmen. †Acantherpestes und †Euphoberia besitzen große Pseudofacettenaugen. Die †Euphoberidae sind Riesen unter den Diplopoden: †Acantherpestes erreichte Größen von 30 und mehr Zentimeter.

Andere oberkarbonische Formen, †Archiulus Scud. und †Xylobius Daws. stellte Scudder wegen der nur „fast konsolidierten" Pro- und Metasomite und wegen der meist breiten Sternite als †Archiulidae ebenfalls zu seinen †Archipolypoda. Fritsch sieht nach böhmischem Material nahe Beziehungen zu den Juliden und kreiert eine Familie Projulidae, die außer den genannten noch †Isojulus, †Pleurojulus Fritsch, Formen mit großen Pseudofacettenaugen, mit einfachen Brustsegmenten und gesonderten Pleuralstücken umfaßt, und †Anthracojulus Fritsch, bei dem durch die zu einem Stück verwachsenen Sternithälften wenigstens ein Merkmal der Proterandria gegeben ist.

In dem oberkarbonischen †Amyni-

[1]) Ein von E. Koken (Vorwelt, S. 145) erwähnter Myriapode aus dem Untersilur Rußlands ist nach freundlicher Mitteilung des Autors zu streichen. Peach (1898) meint, †Necrogammarus Salweyi Woodw. aus dem unteren Ludlow von Leintwardine möchte ein Diplopode sein. Das wäre alsdann die älteste Form; ihre Deutung ist aber ganz unsicher.

lispes Scud., einer weniggliedrigen Form, sieht Scudder (1892) den ältesten echten Diplopoden, einen Oniscomorphen aus der Familie der Glomeridae. Fritsch stellt eine Anzahl böhmischer Formen †Archiscudderia, †Glomeropsis Fritsch



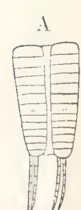


Fig. 3. A †Xylobius (Pylojulus) Sigillariae Dawson. 2 Segmente, Tergite mit zahlreichen Längsleisten. 3fach vergrößert. Aus einem Sigillarienstamm, Ober-Karbon; Joggins, Neu-Schottland. B †X. mazonus Scud. Ober-Karbon; Mazon Creek, Illinois. $1\frac{1}{2}$ natürlicher Größe. Aus Zittel.

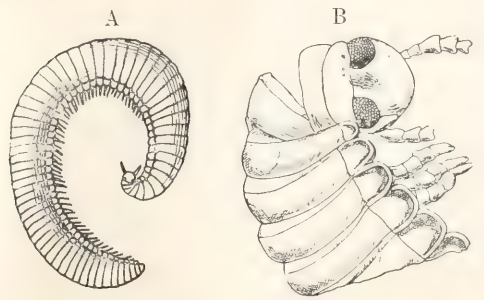


Fig. 4. †Pleurojulus levis A. Fritsch. A vollständiges Exemplar; B Vorderregion 4fach vergrößert: Kopf mit Pseudofacettenaugen, einfache Brustsegmente und die ersten regelmäßigen Diplosomite; Pleurite. Gaskohle, oberstes Karbon; Nürschan, Böhmen. Aus v. Stromer.



Fig. 5. †Amynilispes Wortheni Scudder. Ober-Karbon; Mazon Creek, Illinois. 2fach vergrößert. Aus Zittel.

zu den Oniscomorphen (mit Hinweisen auf die Limacomorpha). Die an Glomeriden erinnernde Körperform gestattet solche Auffassung; und durch die geteilten Sternite wird die Zugehörigkeit zu den Opisthandria als sehr möglich gezeigt. Bei †Glomeropsis sieht Fritsch 4 Längsreihen von Sternalplatten; bei derselben Gattung begegnen uns wieder große Pseudofacettenaugen.

Zweifellose Oniscomorpha (Opisthandria) sind im Bernstein des samländischen Unter-Oligocän gefunden: Glomeris Latr. Einzelne Reste aus dem Cenoman (Perutzer Schichten, Obere Kreide) Böhmens sind zu fragmentär, um sie sicher zu deuten.

Die Proterandria mögen bis ins Unter-Karbon zurück zu verfolgen sein. Peach beschreibt als †Anthracodesmus Macconochiei eine Art aus Schottland, die in der äußeren Form, abgesehen von größerer Segmentzahl, den Polydesmoidea (ordo Proterospermophora) gleicht. Die Gattung Polydesmus Latr. ist aus dem Bernstein bekannt. Von den Lysiopetaloideen wurden Craspedosoma Leach und †Euzonus Menge (mit vorn und hinten besonders schlankem Körper) im Bernstein nachgewiesen. Die Juloideen (ordo Opisthospermophora) mögen nach dem unvollständigen Rest von †Julopsis cretacea Heer aus Grönland und anderen aus Böhmen seit der oberen Kreide als selbständiger Zweig bestehen. Von Julus L. sind Reste in den eocänen Green-river-Schichten von Wyoming, im Bernstein, im Oligocän von Aix und Montpellier, im Miocän von Rott am Siebengebirge, von Oberschwaben und von Colorado (Florissant) und im Diluvium Kaliforniens gefunden. Aus letzterem beschrieb Grinnell auch einen Spirobolidenrest.

β) Pselaphognatha; Oligocän, jetzt.

Polyxenus Latr. und eine nahestehende Gattung †Phryssonotus Scud. (= †Lophonotus Menge) wurden im samländischen Bernstein gefunden.



Fig. 6. Polyxenus †ovalis Koch u. Ber. 5fach vergrößert. Bernstein, Unter-Oligocän; Samland. Aus Zittel.

2b) Chilopoda; Ober-Karbon, obere Kreide (?), Oligocän, jetzt.

Scudder glaubte in einem †Palaeocampa M. a. W. bezeichneten Fossil des Oberkarbon von Illinois, das er zum Typus einer besonderen Ordnung †Protosyngnatha erhob, die paläozoische Ahnform der Chilopoden zu sehen. †Palaeocampa, mit dorsalen und lateralen Reihen großer Borstenbüschel mit auffallend breiten Füßen, ähnelt so sehr Chätopoden, daß die Einreihung in die Myriapoden höchst zweifelhaft ist. Als Ahnform der Chilopoden könnte †Palaeocampa überhaupt keine Rolle spielen, da ihr gleichaltrige echte Chilopoden bekannt sind.

†Latzelia Scud. (Familie †Gerascutigeridae Scud.) aus dem Ober-Karbon von Mazon Creek, Illinois, ist in der Körperform und durch die langen Füße der känozoischen Scutigera Lam. äußerst ähn-

lich; aber die gekielten Dorsalschilder korrespondieren mit den Segmenten, die Femora sind sehr viel länger, etwa = Tibiae + Tarsi, und die mediodorsalen Stomata sollen fehlen(?). Immerhin mag hier ein paläozoischer Vorläufer der Notostigmophora vorliegen. Scutigera selbst ist aus dem Bernstein bekannt.

Die Pleurostigmophora lassen sich wohl bis ins Ober-Karbon zurückverfolgen. Scudders †Eoscolopendridae mit den sehr unvollständig bekannten Gattungen †Eileticus Scud., †Palenarthrus Scud. und †Ilyodes Scud. von Mazon Creek, Illinois mögen den Scolopendridae nahestehen. Scolopendra L. ist aus dem Bernstein, aus dem Oligocän von Aix und aus den Glarner Fischschiefern bekannt. Von den Geophilomorphen ist Geophilus Leach im Bernstein nachgewisen. Fossile Lithobiiden kommen vielleicht schon in der oberen Kreide Böhmens vor; sicher ist Lithobius L. aus dem Bernstein des samländischen Unter-Oligocän bekannt.

3. Stammesgeschichte. Nach dem Fossilmaterial sind die chilognathen Diplopoden (mit Scudders †Archipolypoda) der älteste der Myriapodenstämme. Ihr erstes Auftreten fällt ins Ober-Silur. Mit den Skorpionen sind sie die ältesten Tracheenatmer, die ältesten echten Landtiere, die wir kennen.

Aus den †Archidesmidae (und †Euphoberidae) ist zu schließen, daß die Diplosomite der jüngeren Diplopoden aus Einzelsegmenten hervorgingen.

Wahrscheinlich schon im Karbon war die Teilung in Opisthandria (Glomeridae nach Scudder, Fritsch's karbonische Oniscomorpha) und Proterandria (†Archiulidae Scud., †Projulidae Fritsch, †Anthracodesmus Peach) eingeleitet. Daneben stehen die †Euphoberidae mit der Form der Proterandria und den Sternitbildungen der Opisthandria.

Pselaphognathe Diplopoden sind erst seit dem Tertiär bekannt.

Der Stamm der Chilopoden steht seit dem Ober-Karbon, der Blütezeit (?) vorweltlicher Myriapoden, scharf getrennt neben den Diplopoden; und die paläontologische Ueberlieferung spricht von der bereits im Ober-Karbon angedeuteten Trennung in Notostigmophora und Pleurostigmophora.

Für die Diskussion der Fragen nach der Herkunft der Myriapoden und nach engeren Beziehungen zu anderen Tierklassen bieten die fossilen Formen keine irgendwie gesicherte Unterlage. Ebensowenig lassen sich bestimmte Stammlinien aus den fossilen Myriapoden ableiten.

4. Biologie und geographische Verbreitung. Die Funde der meisten Myriapoden in den kohleführenden Ablagerungen des Karbon, im Bernstein sprechen dafür, daß auch die Myriapoden der Vorzeit Landbewohner waren. Sie entstammen vorwiegend wohl Waldbezirken: Funde in einem Sigillarienstamm von Neu-Schottland und im Bernstein sprechen hierfür.

Scudder hielt die karbonischen †Euphoberidae für amphibisch lebend, da er an ihren Sterniten Kiemenanhänge annahm. Die Funde im Fische-führenden Ober-Silur Schottlands (†Archidesmus loganensis Peach) in marinen Gesteinen des Unter-Karbon (†Pattonia Couttsi Peach in Schottland und einer †Euphoberia ferox von Yorkshire nach H. Woodward) so wie eines höchst zweifelhaften Restes im marinen Ober-Devon Südwest-Englands (†Cariderpestes gyius Whidb.) könnten im Sinne Scudders ausgelegt werden, und Whidborne sprach von aquatischer, mariner Lebensweise.[1]) Woodward und Fritsch protestierten gegen amphibisches Leben der karbonischen Diplopoden. Die vereinzelten Funde in marinen Gesteinen, oder wie im Ober-Silur Schottlands in der Gesellschaft von echten Wassertieren, beweisen in der Tat nichts für amphibische oder gar rein aquatische Lebensweise. Die Lage der Fundstellen gegenüber gleichaltrigen benachbarten Landmassen gestattet es durchaus, die vereinzelten Funde als vom Lande eingeschwemmt anzunehmen. Die paläozoischen Formen mögen wohl auch zum Teil wie manche rezente zeitweilig die Verhältnisse der Flut-Ebbezone ausgehalten haben, damit waren sie aber weder amphibische noch aquatische Tiere. Die sehr große Seltenheit der Funde in marinen Gesteinen, ihr Fehlen in vorobersilurischen spricht dagegen, daß die ältesten Myriapoden etwa Meerestiere gewesen seien.

Zur geographischen Verbreitung der fossilen Myriapoden, die nur aus Nordamerika und Europa bekannt sind, ist eines hervorzuheben. Die Verbreitungsbezirke der Diplopoden-Gattungen waren in der Vorzeit wohl allgemeiner größere als jetzt. So kennen wir im Karbon die Gattungen †Acantherpestes, †Euphoberia, †Aminilispes, †Xylobius aus Europa und Nordamerika.

Literatur. *S. H. Scudder, Myriopoda. In K. A. Zittel, Handbuch d. Paläontologie I, Bd. 2, 1881 bis 1885. Literatur bis 1884.* — *T. D. A. Cockerell, Julus Florissantellus n. sp. Am. Mus. Nat. Hist. Bull. 23, 1907.* — *A. Fritsch, Fauna der Gaskohle und der Kalksteine der Permformation Böhmens, Bd. 4, 1901.*

[1]) Es sei daran erinnert, daß ja auch die ältesten Skorpione vereinzelt als Wasserbewohner angesprochen worden sind.

— **Derselbe**, *Miscellanea palaeontologica. II. Mesozoica. 1910.* — **J. Grinnell**, *Quarternary Myriapods and Insects of California. Cal. Univ. Bull. Dept. of Geol. Bd. 5, 1908.* — **O. Heer**, *Kreideflora d. Arktischen Zone. K. Svenska Vet. Akad. Handl. Bd. 12, 1874.* — **G. F. Matthew**, *On the organic remains of the Little River group. Transact. R. Soc. Canada. Sect. IV, 1894.* — **B. N. Peach**, *On some new Myriapods from the palaeozoic rocks of Scotland. Transact. R. Phys. Soc. Edinburgh, Bd. 14, 1899.* — **S. H. Scudder**, *Index to known foss. Insects of the world, includ. Myriapods a. Arachnids. U. S. Geol. Surv. Bull. 71, 1891.* — **Derselbe**, *New carboniferous Myriapoda from Illinois. Mem. Boston Soc. Nat. Hist. Bd. 4, 1892.* — **Derselbe**, *Notes on Myriapods and Arachnids found in a Sigillarian stump in the Nova Scotia Coalfield. Contrib. to Canad. Palaeont. Bd. 2, T. 1, 1895.* — **G. F. Whidborne**, *Monograph of the Devon. Fauna of the South of England III, Pt I. Pal. Soc. London 1896.* — **H. Woodward**, *On some spined Myriapods from the Carboniferous Series of England. Geol. Mag. Dec. III, Bd. 4, 1887.* — **Derselbe**, *Note on some Crustacea and two Myriapoda from the lower Coalmeasures near Colne, Lancashire. Geol. Mag. Dec. V, Bd. 2, 1905.*

J. F. Pompeckj.



G. Pätz'sche Buchdr. Lippert & Co. G. m. b. H., Naumburg a. d. S.